Cap. 3.1.TRANSMISIÓN DE MODULACIÓN DE AMPLITUD

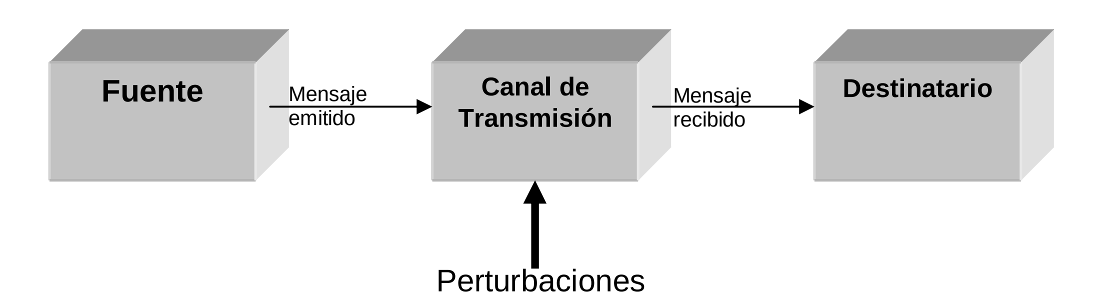
INTRODUCCION

Las señales de información deben ser transportadas entre un transmisor y un receptor sobre alguna forma de medio de transmisión. Sin embargo, las señales de información pocas veces encuentran una forma adecuada para la transmisión. La *modulación* se define como **el proceso de transformar información de su forma original a una forma más adecuada para la transmisión**. *Demodulación* es el proceso inverso (es decir, la onda modulada se convierte nuevamente a su forma original) La modulación se realiza en el transmisor en un circuito llamado *modulador, y* la demodulación se realiza en el receptor en un circuito llamado *demodulador o detector.* El propósito de este texto es introducir al lector a los conceptos fundamentales de la transmisión AM, describir algunos de los circuitos usados en los moduladores AM y describir dos tipos diferentes de transmisores AM.

Supongamos que disponemos de cierta información, analógica o digital, que deseamos enviar por un canal de transmisión. Este último designa al soporte, físico o no, que se utilizará para transportar la información desde la fuente hacia el destinatario. La figura 2.1 resume el enunciado del problema que se acaba de plantear. La información procedente de la fuente puede ser analógica o digital. Por ejemplo, puede tratarse de una señal de audio analógica, de una señal de vídeo, también analógica, o de estas mismas señales digitalizadas.

La forma más simple e históricamente más antigua de la radio comunicación fue la transmisión del código Morse conmutando una portadora entre los estados de encendido y apagado. La portadora se generaba al aplicar una serie de pulsos a un circuito sintonizado por medio de un explosor (spark gap). Técnicamente, esto es una forma de modulación de amplitud, pero es evidente que la técnica no es adecuada para transmisión de audio.

La transmisión práctica de voz y música por medio de la radio AM, tuvo que esperar el desarrollo del tubo al vacío. No obstante, previamente, el inventor e ingeniero de radio Reginald Alubrey Fessenden, realizó el primer intento. El 23 de diciembre de 1900, después de varios intentos infructuosos, Fessenden transmitió unas palabras por medio de un transmisor de explosor con un micrófono de carbono conectado en serie con la antena. Utilizó un transmisor que produjo aproximadamente 10 mil chispas por segundo, produciendo una aproximación de una transmisión continua.



En este caso, son secuencias de caracteres discretos, extraídos de un alfabeto finito de n caracteres, por tanto, puede tratarse de una sucesión de *ceros y unos*, por ejemplo. Hablaremos únicamente de las señales analógicas.

DEFINICIÓN DE LOS TÉRMINOS

Banda base

Se habla de señal en banda base cuando se designan los mensajes emitidos. La banda ocupada se encuentra comprendida entre la frecuencia 0, o un valor muy cercano a éste, y una frecuencia máxima f_{max}.

Ancho de banda de la señal

El ancho de banda de la señal en banda base es la extensión de las frecuencias sobre las que la señal tiene una potencia superior a cierto límite. Generalmente, este límite f_{max} se fija a *-3 dB*, que corresponde a la mitad de la potencia máxima. El ancho de banda se expresa en *Hz, kHz o MHz*.

Espectro de una señal

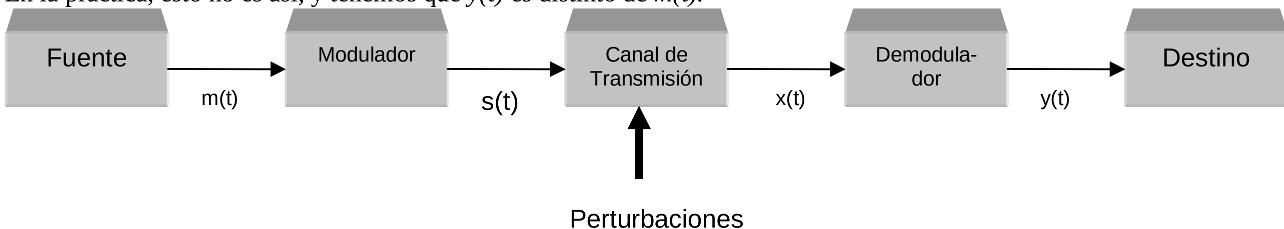
Se habla de espectro de una señal para designar la distribución en frecuencia de su potencia. Se habla también de densidad espectral de potencia, DSP, que es el cuadrado del módulo de la transformada de Fourier de esta señal.

Banda de paso del canal

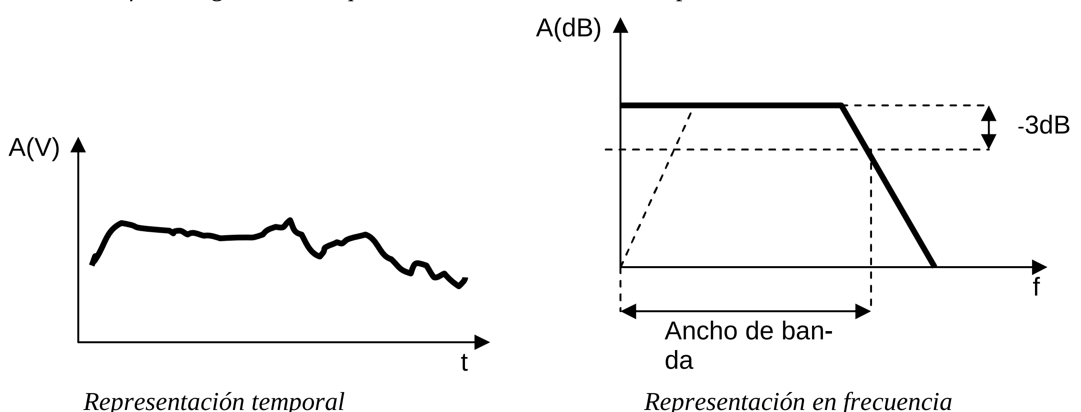
El canal de transmisión puede ser, por ejemplo, *una línea bifilar trenzada, un cable coaxial, una guía de ondas, una fibra óptica o, simplemente, el aire*. Es evidente que ninguno de estos soportes está caracterizado con la misma banda de paso. La banda de paso del canal no debe confundirse con la distribución espectral de la señal en banda base.

FINALIDAD DE LA MODULACIÓN

El objetivo de la modulación es el de adaptar la señal que se va a transmitir al canal de comunicaciones que hay entre la fuente y el destinatario. Se introducen, por tanto, dos operaciones suplementarias a la de la figura anterior; entre la fuente y el canal, una primera operación llamada modulación, y entre el canal y el destinatario, una segunda denominada desmodulación. La cadena de transmisión global queda entonces como se representa en la figura siguiente.
El objetivo de la transmisión es el de hacer llegar el mensaje emitido m(t) al destinatario.
En el caso ideal, se tiene: *y(t) = m(t).*
En la práctica, esto no es así, y tenemos que *y(t)* es distinto de *m(t).*

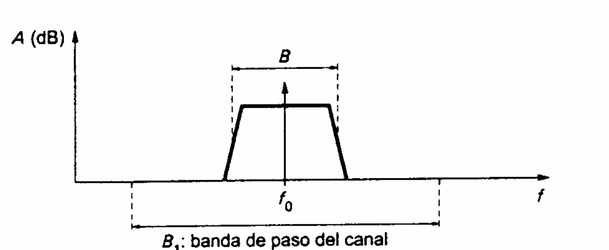


La diferencia reside principalmente en la presencia de ruido debido a las perturbaciones que afectan al canal de transmisión y en las imperfecciones de los procesos de modulación y desmodulación.
La señal m(t) es la señal en banda base que se va a transmitir. Puede ser representada tanto en forma temporal como en forma de espectro de frecuencias. Estas dos formas se han dibujado juntas debajo. La modulación recurre a una nueva señal auxiliar de frecuencia *fo*. Esta frecuencia *fo* recibe el nombre de frecuencia portadora o frecuencia central. Evidentemente, la frecuencia *fo* se elige de forma que se encuentre en la banda de paso del canal de transmisión B,.



Representación temporal *Representación en frecuencia*

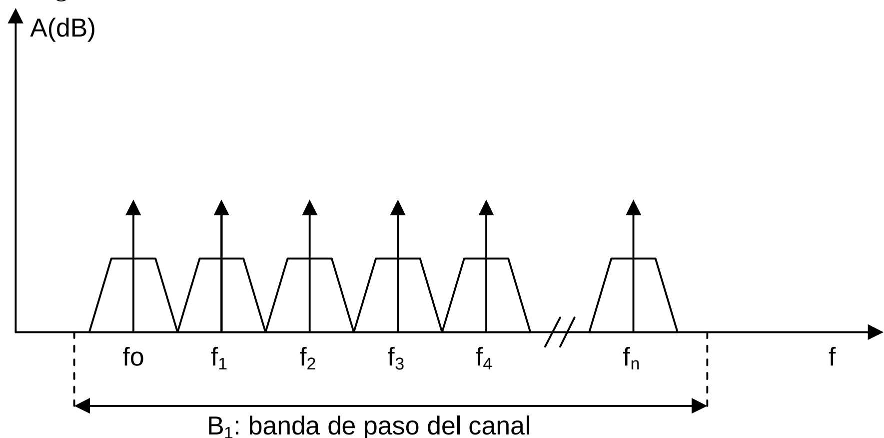
La señal que será transmitida, s(t), es la señal llamada portadora a la frecuencia *fo* , modulada por el mensaje *m(t).*
La señal *s(t)* ocupa una banda *B* en tomo a la frecuencia *fo*, como se ve en la figura . Este ancho *B* es un parámetro importante y está en función del tipo de modulación. En muchos casos, lo que se persigue es reducir *B* para albergar en la banda de frecuencias B_1 el máximo de información. Por ello, se realiza una multiplexación de frecuencias de forma que se puedan transmitir simultáneamente sobre el mismo medio el mayor número de mensajes.



La representación espectral de las señales transportadas en el canal de transmisión quedaría entonces como se muestra en la figura siguiente. En el sentido general del término, la modulación es una operación que consiste en transmitir una señal moduladora por medio de una señal llamada portadora v(t).

$$v(t) = A\cos(\omega t + \phi)$$

La modulación consiste en efectuar un cambio o variación en alguno de los parámetros de *v(t).* La actuación sobre A se traduce en una *modulación de amplitud*; si se actúa sobre ω se modula la *frecuencia*, mientras que si se actúa sobre φ la modulación es de *fase*. Estos tres tipos de modulación se pueden aplicar tanto si la señal moduladora *m(t)* es analógica como si es digital.



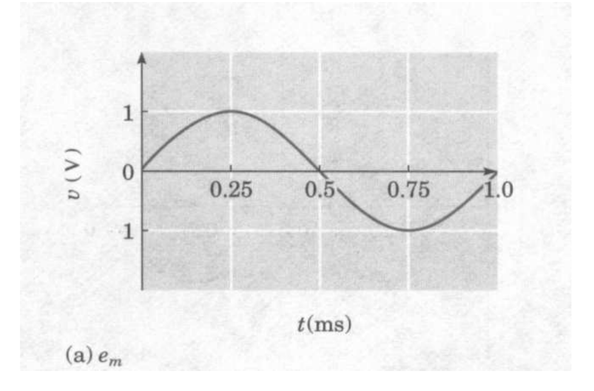
MODULACION DE AMPLITUD

Modulación de amplitud (AM) es el proceso de cambiar la amplitud de una portadora de frecuencia relativamente alta de acuerdo con la amplitud de la señal modulante (información) Las frecuencias que son lo suficientemente altas para radiarse de manera eficiente por una antena y propagarse por el espacio libre se llaman comúnmente radiofrecuencias o simplemente RF. Con la modulación de amplitud, la información se imprime sobre la portadora en la forma de cambios de amplitud. La modulación de amplitud es una forma de modulación relativamente barata y de baja calidad de transmisión, que se utiliza en la radiodifusión de señales de audio y vídeo. La banda de radiodifusión comercial AM abarca desde 535 a 1605 kHz. La radiodifusión comercial de televisión se divide en tres bandas (dos de VHF y una de UHF) Los canales de la banda baja de VHF son entre 2 y 6 (54 a 88 MHz), los canales de banda alta de VHF son entre 7 y 13 (174 a 216 MHz) y los canales de UHF son entre 14 a 83 (470 a 890 MHz). La modulación de amplitud también se usa para las comunicaciones de radio móvil de dos sentidos tal como una radio de banda civil (CB) (26.965 a 27.405 MHz) o los aviones con los aeropuertos (118 a 136 Mhz)

Un modulador de AM es un aparato no lineal con dos señales de entrada: a)una señal portadora de amplitud constante y de frecuencia única y b)la señal de información. La información “actúa sobre” o “modula” la portadora y puede ser una forma de onda de frecuencia simple o compleja compuesta de muchas frecuencias que fueron originadas de una o más fuentes. Debido a que la información actúa sobre la portadora, se le llama señal modulante. La resultante se llama onda modulada o señal modulada.

La envolvente de AM

Son posibles de generar varias formas o variaciones de modulación de amplitud. Aunque matemáticamente no es la forma más sencilla, la portadora de AM de doble banda lateral (AM DSBFC) se discutirá primero, puesto que probablemente sea la forma más utilizada de la modulación de amplitud. AM DSBFC se le llama algunas veces como AM convencional.(Double Side Band Frequency Carrier)
La figura 3-1a muestra un modulador AM DSBFC simplificado que ilustra la relación entre la portadora $[V_c sen(2\pi f_c t)]$ la señal de entrada (modulante) de la información $[V_m sen(2\pi f_m t)]$, y la onda modulada $[V_{am}(t)]$ La figura 3-1b muestra en el dominio de tiempo como se produce una onda AM a partir de una señal modulante de frecuencia simple. La onda modulada de salida contiene todas las frecuencias que componen la señal AM y se utilizan para llevar la información a través del sistema. Por lo tanto, a la forma de la onda modulada se le llama la *envolvente.* Sin señal modulante, la onda de salida simplemente es la señal portadora amplificada. Cuando se aplica una señal modulante, la amplitud de la onda de salida varía de acuerdo a la señal modulante. Obsérvese que la forma de la envolvente de AM es idéntica a la forma de la señal modulante. Además, el tiempo de un ciclo de la envolvente es el mismo que el periodo de la señal modulante. Consecuentemente, la relación de repetición de la envolvente es igual a la frecuencia de la señal modulante.
La técnica básica de la modulación de amplitud también puede modificarse, para servir como base para una variedad de esquemas más complejos que se encuentran en aplicaciones tan diversas como la radiodifusión de televisión y la telefonía de larga distancia. Así, es esencial entender con cierto detalle el proceso de la modulación de amplitud, por su propia importancia y como fundamento para estudios posteriores.
Una señal de AM se produce al usar la amplitud instantánea de la señal de información (la señal moduladora o en banda base), para variar la amplitud máxima o de cresta de una señal de frecuencia superior. En la figura 3-2(a), se muestra una onda seno de 1 kHz, que puede combinarse con las señal de 10 kHz mostrada en la figura 3.1(b), para producir la señal de AM de la figura 3.1(c). Si se unen las crestas de la forma de onda de la señal modulada, la envolvente resultante se asemeja a la señal moduladora original. Ésta se repite a la frecuencia moduladora, y la forma de cada "mitad" (positiva o negativa), es la misma que la de la señal moduladora.
La señal de frecuencia superior que se combina con una señal de información para producir la forma de onda modulada, se llama portadora. En la figura 3.1(c) se observa un caso en el que sólo hay 10 ciclos de la portadora para cada ciclo de la señal moduladora. En la práctica, la relación entre la frecuencia de portadora y la frecuencia moduladora, es por lo general mucho mayor. Por ejemplo, una estación de radiodifusión de AM podría tener una frecuencia de portadora de 1 MHz y una frecuencia moduladora del orden de 1 kHz. Una forma de onda como ésta se muestra en la figura 3.2.



Puesto que hay 1000 ciclos de la portadora por cada ciclo de la envolvente, los ciclos de RF individuales no son visibles, y sólo se ve la envolvente.
Observe que la modulación de la amplitud *no es* la suma lineal simple de las dos señales. La suma lineal produciría las formas de onda de la figura 3.3. En la figura 3.3(a) se muestra una señal de baja frecuencia, en la figura 3.3(b) una de frecuencia superior y en la figura 3.3(c) el resultado de sumar las dos señales.

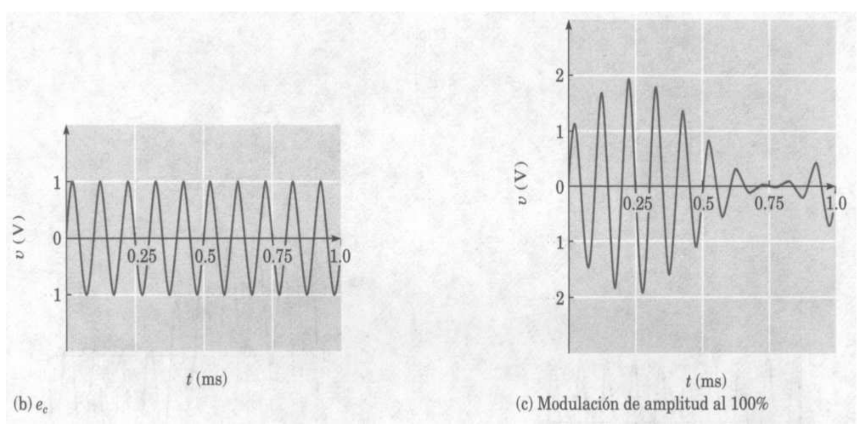


Figura 3.1bis .- AM

La modulación de la amplitud es en esencia un proceso *no lineal*. Como en cualquier interacción no lineal entre señales, se producen frecuencias de suma y diferencia que, en el caso de la modulación de amplitud, contienen la información por transmitir. Otra cuestión interesante acerca de la AM es que aunque al parecer estemos variando la amplitud de la portadora (de hecho, esto es lo que se da entender con el término modulación de la amplitud), una mirada al dominio de la frecuencia deja ver que el componente de la señal a la frecuencia de la portadora permanece intacto, *¡con la misma amplitud y frecuencia que antes!* Este misterio se aclara con la ayuda de un poco de matemáticas, como se verá en breve; por el momento, sólo recuerde que AM es un nombre un tanto inapropiado, puesto que la amplitud de la portadora permanece constante en el dominio de la frecuencia. La amplitud de la señal completa no cambia sin modulación, como se ve claramente en la figura 3.1.bis.

Espectro de frecuencia de AM y ancho de banda

Como se estableció anteriormente, un modulador AM es un dispositivo no lineal . Por lo tanto, ocurre una mezcla no lineal (producto) y la envolvente de salida es una onda compleja compuesta por un voltaje de c.c., la frecuencia portadora y las frecuencias de suma ($f_c + f_m$) y diferencia ($f_c - f_m$) (es decir, los productos cruzados) La suma y la diferencia de frecuencias son desplazadas de la frecuencia portadora por una cantidad igual a la frecuencia de la señal modulante. Por lo tanto, una envolvente de AM contiene componentes en frecuencia espaciados por "f_m" Hz en cualquiera de los lados de la portadora. Sin embargo, debe observarse que la onda modulada no contiene una componente de frecuencia que sea igual a la frecuencia de la señal modulante. El efecto de la modulación es trasladar la señal de modulante en el dominio de la frecuencia para reflejarse simétricamente alrededor la frecuencia de la portadora.

La figura 3-2 muestra el espectro de frecuencia para una onda de AM. El espectro de AM abarca desde ($f_c - f_{m(max)}$) a ($f_c + f_{m(max)}$) en donde f_c es la frecuencia de la portadora y $f_{m(max)}$ es la frecuencia de la señal modulante más alta. La banda de frecuencias entre $f_c - f_{m(max)}$ y f_c se llama *banda lateral inferior (LSB) y* cualquier frecuencia dentro de esta banda se llama *frecuencia lateral inferior (LSF*). La banda de frecuencias entre fc y fc +fm(max) se llama banda lateral superior (USB) y cualquier frecuencia dentro de esta banda se llama frecuencia lateral superior (USF). Por lo tanto, el ancho de banda (B ó BW) de una onda AM DSBFC es igual a la diferencia entre la frecuencia lateral superior más alta y la frecuencia lateral inferior más baja o sea dos veces la frecuencia de la señal modulante más alta (es decir, B = 2fmmax) Para la propagación de una onda radio, la portadora y todas las frecuencias dentro de las bandas laterales superiores e inferiores debe ser lo suficientemente altas para propagarse por la atmósfera de la Tierra (incluida la ionosfera)

En la figura 3.4.bis(a) se ilustran las representaciones en el dominio de la frecuencia para la modulación de amplitud, y en la figura 3.4.bis(b) se muestra la suma lineal de las dos señales. La señal de AM no tiene componente en la frecuencia moduladora: toda la información se transmite a frecuencias cercanas a la de la portadora.

En contraposición, la suma lineal no logró nada: en el bosquejo del dominio de frecuencia se observa que las señales de la información y la portadora están separadas, cada una a su frecuencia original.

EJEMPLO 3-1

Para un modulador de AM DSBFC con una frecuencia portadora f_c = 100 kHz y una frecuencia máxima de la señal modulante $f_m(max)$ = 5 kHz, determine:

(a) Limites de frecuencia para las bandas laterales superior e inferior.
(b) Ancho de banda.
(c) Frecuencias laterales superior e inferior producidas cuando la señal modulante es un tono de 3 kHz de frecuencia simple.

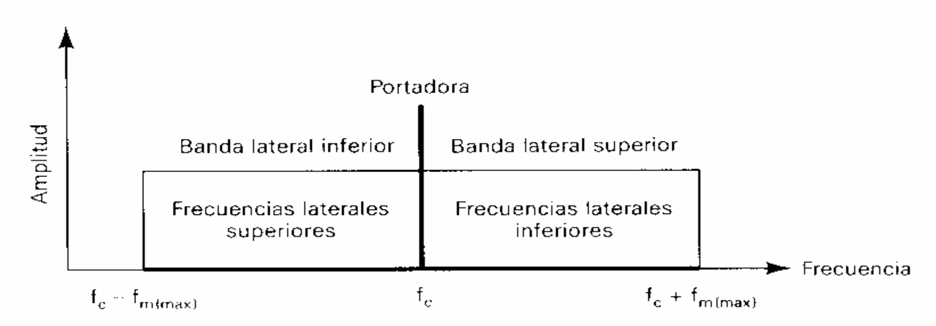


Figura 3-2 Espectro de frecuencia de una onda AM DSBFC.

(d) Dibuje el espectro de la frecuencia de salida.

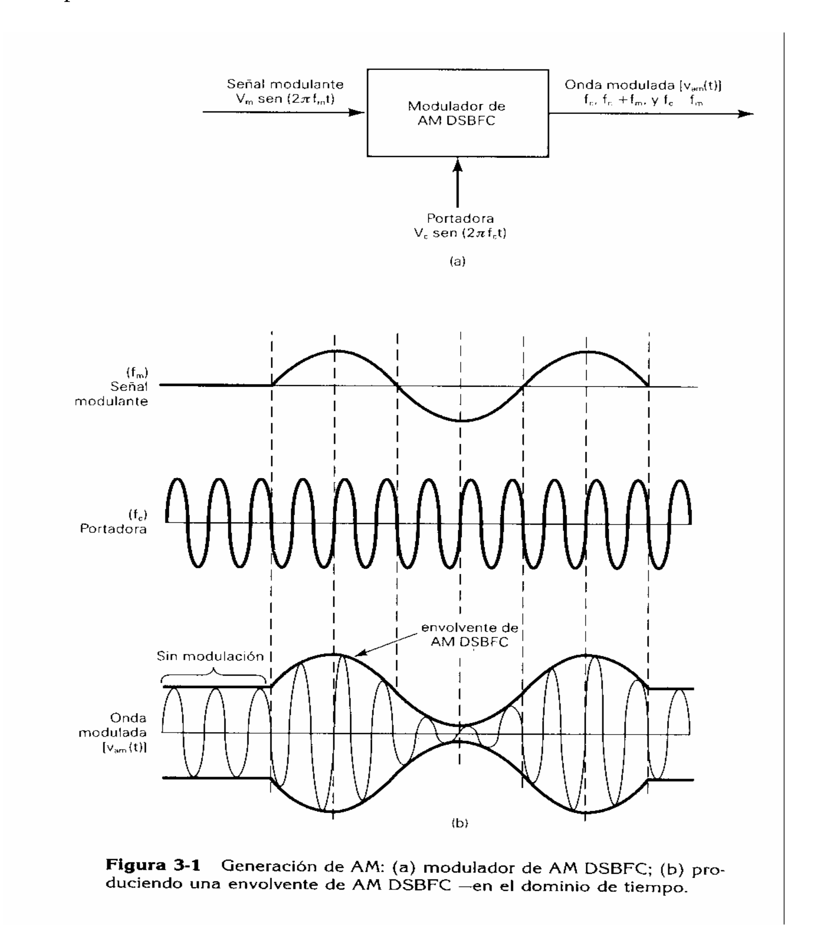


Figura 3-1 Generación de AM: (a) modulador de AM DSBFC; (b) produciendo una envolvente de AM DSBFC —en el dominio de tiempo.

Solución (a) La banda lateral inferior se extiende desde la frecuencia lateral inferior más baja posible a la frecuencia portadora o

$LSB = [f_c - f_{m(max)}]$ a $f_c \Rightarrow (100 - 5)$ kHz a 100 kHz $\Rightarrow 95$ a 100 kHz

La banda lateral superior se extiende desde la frecuencia portadora a la frecuencia lateral superior más alta posible o

USB = f_c a $[f_c + f_{m(max)}]$

$\Rightarrow$ 100 kHz a (100 + 5) kHz $\Rightarrow$ 100 a 105 kHz

(b) El ancho de banda es igual a la diferencia entre la máxima frecuencia lateral superior y la mínima frecuencia lateral inferior o

$B = 2f_{m(max)} = 2x(5\ kHz) = 10\ kHz$

(c) La frecuencia lateral superior es la suma de la portadora y la frecuencia modulante o

$f_{usf} = f_c + f_m = 100kHz + 3kHz = 103kHz$

La frecuencia lateral inferior es la diferencia entre la portadora y la frecuencia modulante

$F_{lsf} = f_c - f_m = 100kHz - 3kHz = 97kHz$

(d) El espectro de frecuencia de salida se muestra en la figura 3-3.

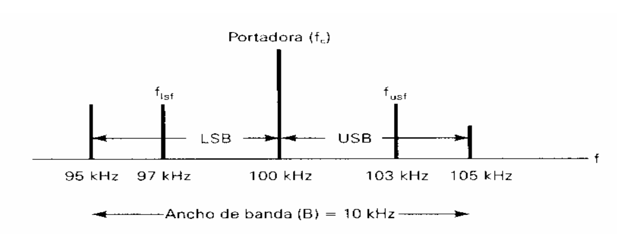


Figura 3-3 Espectro de salida para el ejemplo 3-1.

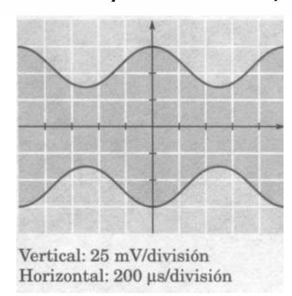
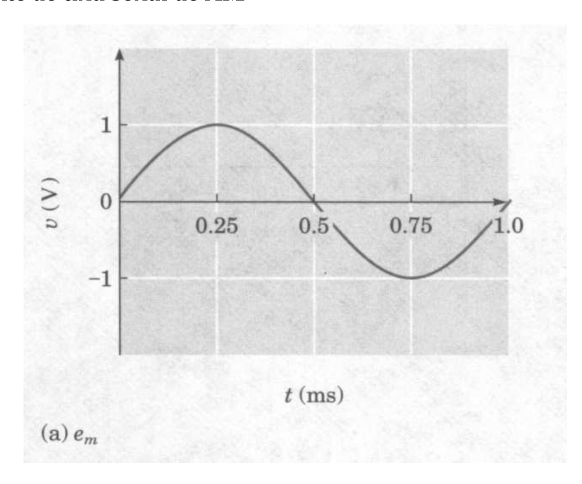


Figura 3.2.bis Envolvente de una señal de AM



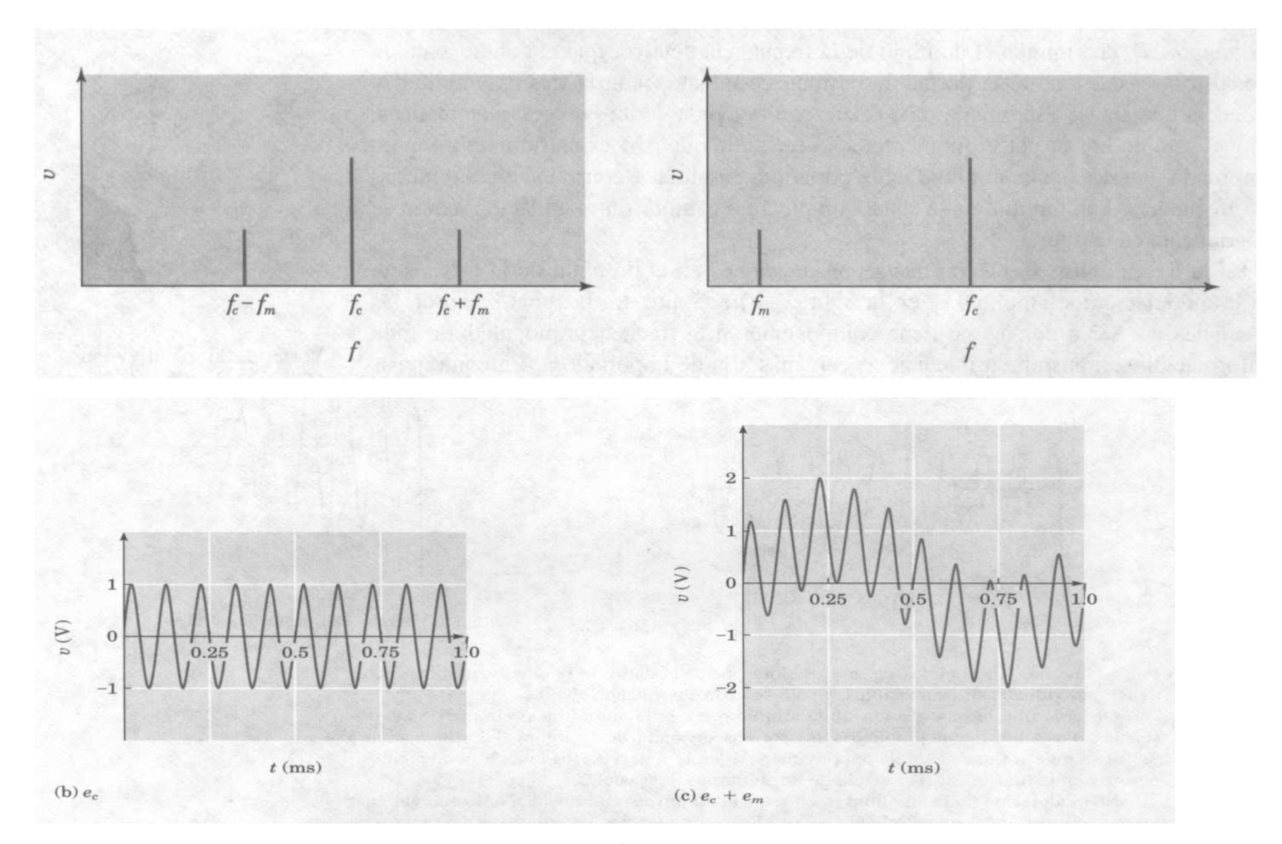


Figura 3.4.bis.- AM y suma lineal en el dominio de la frecuencia

EJEMPLO. Una portadora con un voltaje RMS de 2 V y frecuencia de 1.5 MHz es modulada por una onda seno con una frecuencia de 500 Hz y amplitud de 1 V RMS. Escriba la ecuación para la señal resultante.
Solución: Primero, observe que la ecuación de AM requiere voltajes de pico y frecuencias en radianes. Éstos pueden obtenerse fácilmente como sigue:

$$\begin{aligned} E_c &= \sqrt{2} \times 2 \text{ V} \\ &= 2.83 \text{ V} \\ E_m &= \sqrt{2} \times 1 \text{ V} \\ &= 1.41 \text{ V} \end{aligned}$$

La ecuación también requiere frecuencias en radianes:

$$\begin{aligned} \omega_c &= 2\pi \times 1.5 \times 10^6 \\ &= 9.42 \times 10^6 \text{ rad/s} \\ \omega_m &= 2\pi \times 500 \\ &= 3.14 \times 10^3 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

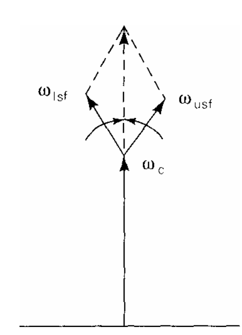
Así que la ecuación es:

$$\begin{aligned} v(t) &= (E_c + E_m \text{ sen } \omega_m t) \text{ sen } \omega_c t \\ &= [2.83 + 1.41 \text{ sen } (3.14 \times 10^3 t)] \text{ sen } (9.42 \times 10^6 t) \text{ V} \end{aligned}$$

Representación fasorial de una onda modulada en amplitud

Para una señal modulante de frecuencia única, se produce una envolvente de AM a partir del vector suma de la portadora y de las frecuencias laterales superiores e inferiores. Las dos frecuencias laterales se combinan y producen un componente resultante que a su vez se combina con el vector de la portadora. La figura 3-4a muestra esta adición fasorial. Los fasores para la portadora y las frecuencias laterales superiores e inferiores giran en una dirección contraria a las manecillas del reloj. Sin embargo, la frecuencia lateral superior gira más rápido que la portadora ($\omega usf > \omega c$) y la frecuencia lateral inferior gira más lenta ($\omega isf < \omega c$) Consecuentemente, si el fasor para la portadora se mantiene estacionario, el fasor para la frecuencia lateral superior continuará girando en una dirección contraria a las manecillas del reloj respecto a la portadora, y el fasor para la frecuencia lateral inferior girará en la dirección de las manecillas del reloj. Los fasores para la portadora y las frecuencias superiores e inferiores combinan, a veces en fase (adición) y a veces fuera de fase (sustracción) Para la forma de onda mostrada en la figura 3-4b, la máxima amplitud positiva de la envolvente ocurre cuando la portadora y las frecuencias laterales superiores e inferiores están es sus máximos valores positivos al mismo tiempo ($+ Vmax = Vc + Vusf + Visf$). La mínima amplitud positiva de la envolvente ocurre cuando la portadora está en su máximo valor positivo al mismo tiempo que las frecuencias laterales superiores e inferiores estén en sus máximos valores negativos ($+ Vmin = Vc – Vusf – Visf$) La máxima amplitud negativa ocurre cuando la portadora y las frecuencias laterales superiores e inferiores están en sus máximos valores negativos al mismo tiempo ($- Vmax= - Vc – Vusf – Visf$).

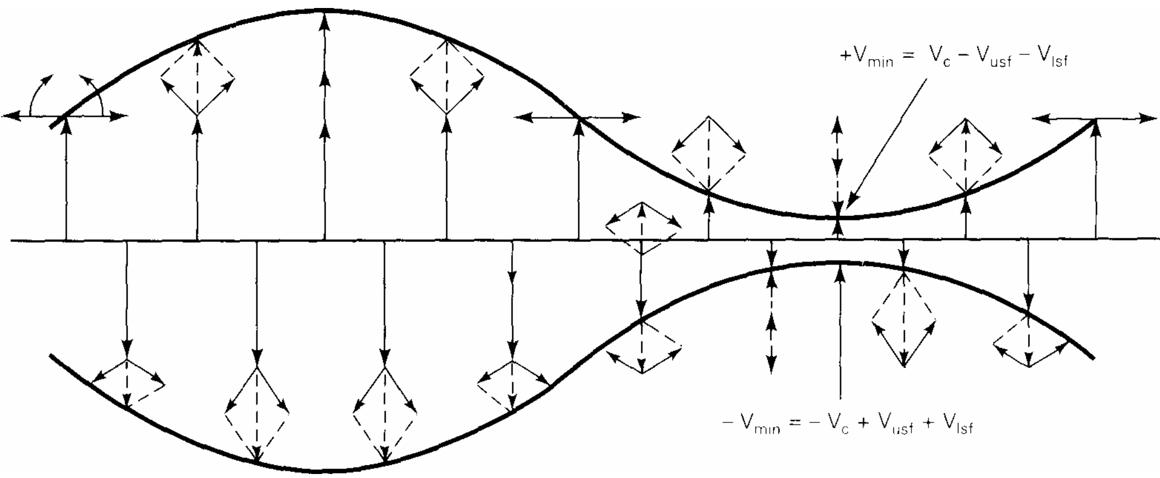
Adición fasorial



V_{usf} = voltaje de la frecuencia lateral superior
V_{isf} = voltaje de la frecuencia lateral inferior

Vc = voltaje de la portadora

$+ Vmax - Vc + Vusf + V_{isf}$



Tiempo

V_{max} -- Vc - Vusf - Vusf

Figura 3-4 *La adición fasorial en una envolvente de AM DS13FC: (a) adición fasorial de la portadora y las frecuencias laterales superior e inferior; (b) adición fasorial produciendo una envolvente de AM.*

La mínima amplitud **negativa** ocurre cuando la portadora está en su máximo valor **negativo** al mismo tiempo que las frecuencias laterales negativas y positivas están en sus máximos valores **positivos** **(-** V_{min} = - Vc + V_{usf}+ V_{isf}).

Coeficiente de modulación y porcentaje de modulación

Coefeciente de modulación es un término utilizado para describir la cantidad de cambio de amplitud (modulación) presente en una forma de una onda de AM. *El porcentaje de modulación* es simplemente el coeficiente de modulación establecido como un porcentaje. Más específico, el porcentaje de modulación proporciona el cambio de porcentaje en la amplitud de la onda de salida cuando está actuando sobre la portadora por una señal modulante. Matemáticamente, el coeficiente de modulación es

$$m = \frac{E_m}{E_c} \quad (3\text{-}1)$$

en donde

m = coeficiente de modulación (sin unidad)

E_m= cambio pico en la amplitud del voltaje de la forma de onda de salida (volts)

Ec= amplitud pico del voltaje de la portadora no modulada (volts)

La ecuación 3-1 puede rearreglarse para resolver a Em y Ec como

Em = mEc (3-2)

Ec = Em/m (3-3)

y el porcentaje de modulación (M) es

$$M = Em/Ec \times 100 \qquad (3\text{-}4)$$

Las relaciones entre *m, Em y Ec* se muestra en la figura 3-5.

Si la señal modulante es una onda seno pura de frecuencia simple y el proceso de modulación es simétrico (es decir, las excursiones positivas y negativas de la amplitud de la envolvente son iguales), el porcentaje de modulación puede derivarse de la siguiente manera (refiérase a la figura 3-5 para la siguiente derivación):

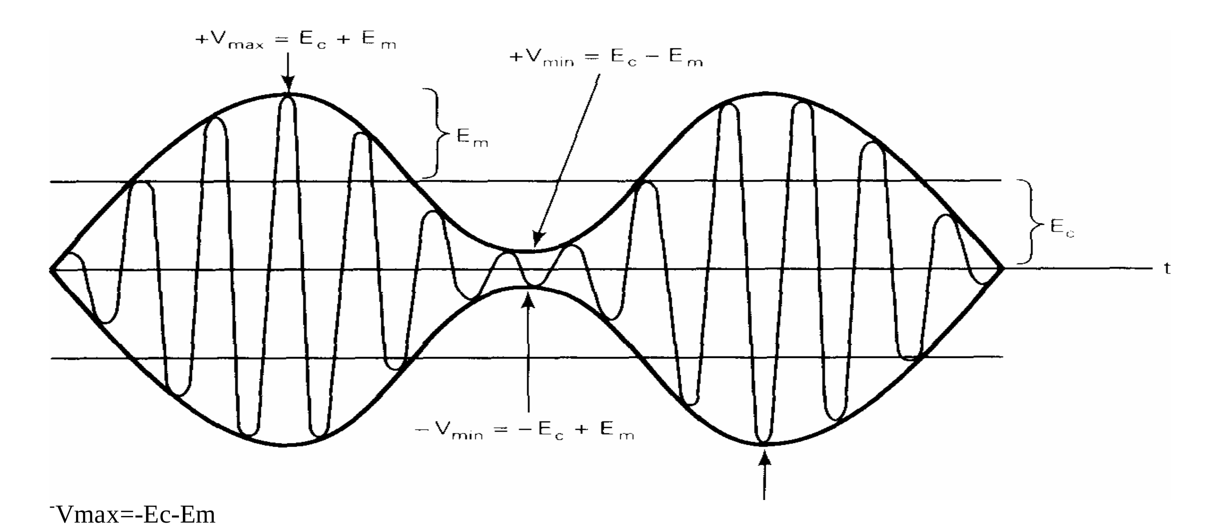
$$Em = ½ (V_{max} – V_{min}) \qquad (3\text{-}5)$$

$$Ec = ½ (V_{max} + V_{min}) \qquad (3\text{-}6)$$

Por lo tanto

$$M = \frac{\frac{1}{2}(V_{max} - V_{min})}{\frac{1}{2}(V_{max} + V_{min})} \text{x}100$$

$$M = \frac{(V_{max} - V_{min})}{(V_{max} + V_{min})} x100 \qquad (3\text{-}7)$$



-Vmax=-Ec-Em

Figura 3-5 *Coeficiente de modulación,* E_m *y* E_c

en donde V_{max} = Ec + Em y V_{min} =Ec - Em

El cambio pico en la amplitud de la onda de salida (Em) es la suma de los voltajes de las frecuencias laterales superiores e inferiores. Por lo tanto, ya que Em = E_{usf} + E_{isf} *y* E_{usf} = E_{isf} entonces

$$E_{usf} = E_{isf} = \frac{E_m}{2} = \frac{\frac{1}{2}(V_{max} - V_{min})}{2} = \frac{1}{4}(V_{max} - V_{min}) \qquad (3\text{-}8)$$

en donde E_{usf} = amplitud pico de la frecuencia lateral superior (volts)
E_{isf} = amplitud pico de la frecuencia lateral inferior (volts)

De la ecuación 3-1 puede observarse que el porcentaje de modulación llega a 100% cuando Em = Ec. Esta condición se muestra en la figura 3-6d. También puede observarse que en una modulación al 100%, la mínima amplitud de la envolvente es $\mathbf{V_{min} = 0\ V}$. La figura 3-6c muestra una envolvente modulada al 50%; el cambio pico en la amplitud de la envolvente es igual a la mitad de la amplitud de la onda no modulada. El porcentaje máximo que puede imponerse sin provocar una distorsión excesiva es del 100%. A veces el porcentaje de modulación se expresa como el cambio pico en el voltaje de la onda modulada con respecto a la amplitud pico de la portadora no modulada (es decir, porcentaje de cambio = $\Delta E_c/E_c \times 100$)

Sobremodulación

Cuando el índice de modulación es mayor que 1, se dice que hay sobremodulación. En la ecuación del tiempo de AM no hay nada que pudiera evitar que E_m fuera mayor que E_c y que m fuera mayor que 1. Sin embargo, hay dificultades prácticas. En la figura 3.6(a) se observa el resultado de sustituir m = 2 en la ecuación original. Como puede verse, la envolvente ya no se asemeja a la señal moduladora, por consiguiente, *m* **debe** ser menor o igual a 1.

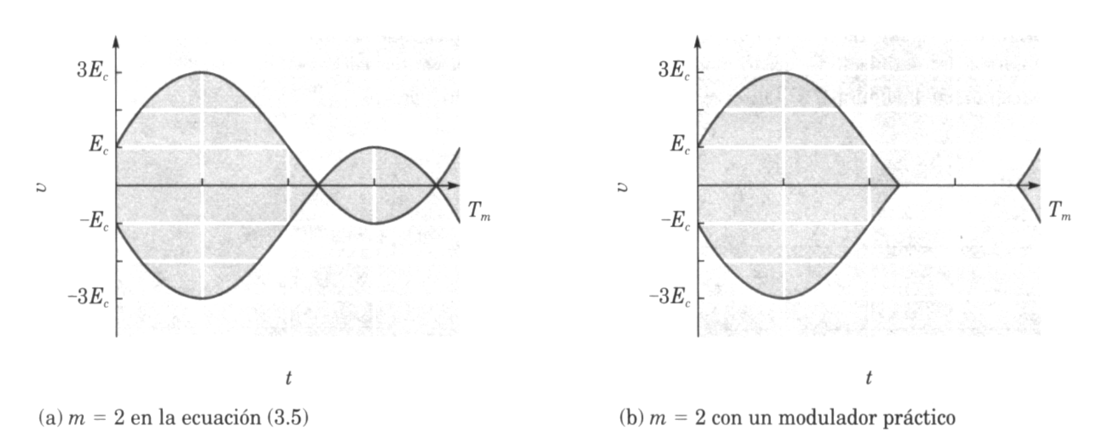


Figura 3.6.bis.- Sobremodulación

Siempre que trabajemos con modelos matemáticos, debe recordarse verificar contra la realidad física. Esta situación es un buen ejemplo. Es posible construir un circuito que produce una salida que concuerda con la ecuación de AM del tiempo, para m mayor que 1. Sin embargo, en estas condiciones, la mayoría de los moduladores prácticos de AM producen la señal mostrada en la figura 3.6(b). Esta no es la forma de onda predicha por la ecuación (3.5), pero tiene la característica de que la envolvente de modulación ya no es una representación precisa de la señal moduladora. De hecho, si se somete al análisis de Fourier, se encontraría que las componentes "afiladas o puntiagudas" de la forma de onda, cuando la salida disminuye a cero en los picos de modulación negativa, representan componentes de alta frecuencia agregados a la señal en banda base original. Con este tipo de sobremodulación se crean frecuencias laterales más alejadas de la portadora de lo que estarían en otro caso. Estas frecuencias espurias se conocen como distorsión por sobremodulación (splatter), y hacen que la señal modulada tenga un ancho de banda mayor.

EJEMPLO 3-2

Para la forma de onda de AM mostrada en la figura 3-7, determine:

(a) Amplitud pico de las frecuencias laterales superior e inferior.
(b) Amplitud pico de la portadora no modulada.
(c) Cambio pico en la amplitud de la envolvente.
(d) Coeficiente de modulación.
(e) Porcentaje de modulación.

Solución:
a) De la ecuación 3-8 $E_{usf} = E_{isf} = ¼ (18 – 2) = 4V$
b) De la ecuación 3-6 $E_c = ½ (18 + 2) = 10V$
c) De la ecuación 3-5 $E_m = ½ (18 – 2) = 8V$
d) De la ecuación 3-1 $m = 8/10 = 0,8$
e) De la ecuación 3-4 $M = 0,8 \times 100 = 80\%$
y de la ecuación 3-7 $M = [(18-2)/(18+2)] \times 100 = 80\%$

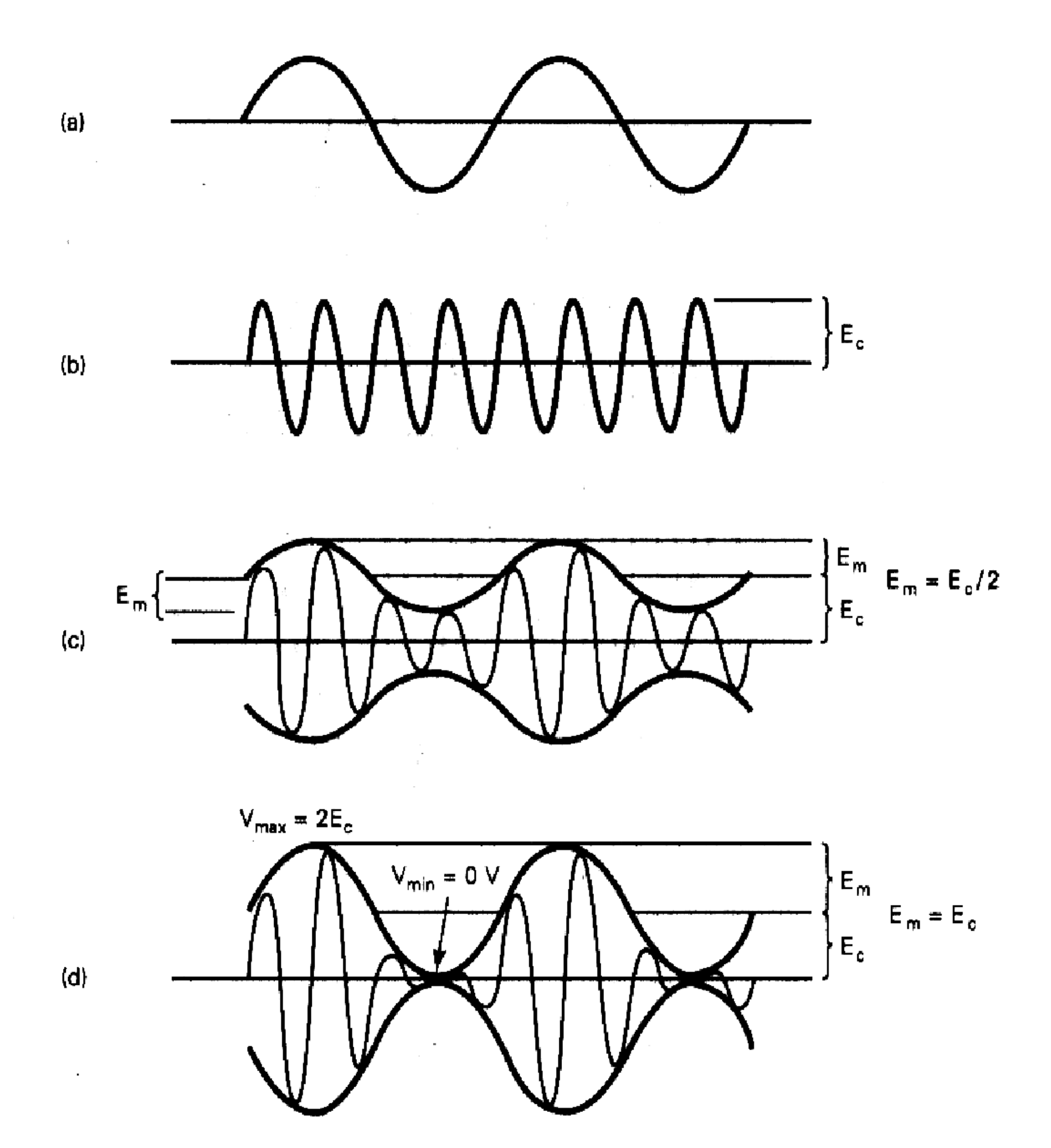


Figura 3-6 *Porcentaje de modulación de una envolvente de AM DSBFC (a) señal modulante; (b) portadora no modulada; (c) onda modulada 50%; (d) onda modulada 100%.*

(b) De la ecuación 3-6,

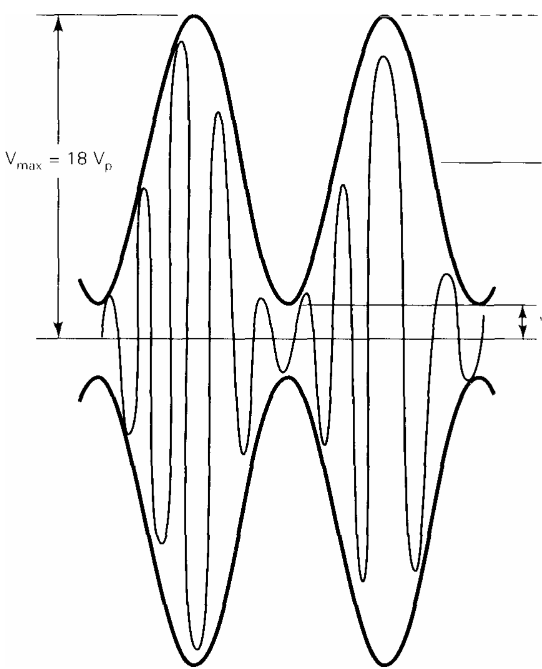


Figura 3-7 *Envolvente de AM para el Ejemplo 3-2.*

Distribución de voltaje AM

Una portadora no modulada puede describirse matemáticamente como

$$Vc(t) = E_c\,sen(2\pi f_c t)$$

en donde *Vc(t) = forma de onda de voltaje de tiempo variante para la portadora*
E = amplitud pico de la portadora (volts)
fc = frecuencia de la portadora (hertz)

En la sección anterior fue señalado que la relación de repetición de una envolvente de AM es igual a la frecuencia de la señal modulante, la amplitud de la onda AM varía proporcionalmente a la amplitud de la señal modulante y la máxima amplitud de la onda modulada es igual a *Ec + Em*. Por lo tanto, la amplitud instantánea de la onda modulada puede expresarse como

$$V_{am}(t) = [E_c + E_m \operatorname{sen}(2\pi f_m t)][\operatorname{sen}(2\pi f_c t)] \quad (3\text{-}9a)$$

en donde $[Ec + E_m sen(2\pi f_m t)]$ = amplitud de la onda modulada
E_m = amplitud pico en la amplitud de la envolvente (volts)
f_m= frecuencia de la señal modulante (hertz)

Si se sustituye E_m por *mEc*

$$V_{am}(t)= [(E_c + mE_c sen(2\pi f_m t))][sen(2\pi f_c t)] \qquad (3\text{-}9b)$$

en donde $[E_c + mE_c sen(2\pi\, f_m t)]$ = amplitud de la onda modulada.

Factorizando Ec de la ecuación 3-9b y arreglando resulta en

$$V_{am}(t) = [1 + m\,\mathrm{sen}(2\pi f_m t)][E_c\,\mathrm{sen}(2\pi f_c t)] \quad (3\text{-}9c)$$

En la ecuación 3-9c, puede observarse que la señal modulante contiene un componente constante (1) y un componente sinusoidal en la frecuencia de la señal modulante [$m\mathrm{sen}(2\pi f_m t)$]. El siguiente análisis muestra cómo la componente constante produce la componente de la portadora en la onda modulada y la componente sinusoidal produce las frecuencias laterales. Multiplicando la ecuación 3-9b o c produce

$$V_{am}(t) = E_c\,\mathrm{sen}(2\pi f_c t) + [mE_c\,\mathrm{sen}(2\pi f_m t)][\mathrm{sen}(2\pi f_c t)]$$

La identidad trigonométrica para el producto de dos senos con diferentes frecuencias es

$$(\mathrm{sen}\,A)(\mathrm{sen}\,B) = -\frac{1}{2}\cos(A+B) + \frac{1}{2}\cos(A-B)$$

Por lo tanto,

$$V_{am}(t) = E_c\,\mathrm{sen}(2\pi f_c t) - \frac{mE_c}{2}\cos[2\pi(f_c + f_m)t] + \frac{mE_c}{2}\cos[2\pi(f_c - f_m)t] \quad (3\text{-}10)$$

Donde el primer término es la portadora propiamente dicha, el segundo término es la frecuencia lateral superior y el tercero es la frecuencia lateral inferior.

Varias características interesantes sobre la modulación de amplitud de la doble banda lateral con portadora completa pueden señalarse a partir de la ecuación 3-10. Primero, observe que la amplitud de la portadora después de la modulación *es igual* a como era antes de la modulación (E_c). Por lo tanto, **la amplitud de la portadora no está afectada por el proceso de modulación**. Segundo, la amplitud de las frecuencias laterales superiores e inferiores depende de la amplitud de la portadora y del coeficiente de modulación. Para una modulación al **100%,** **m = 1** y las amplitudes de las frecuencias laterales superiores e inferiores es cada una igual a la mitad de la amplitud de la portadora (Ec/2). Por lo tanto, para una modulación de 100%

$$V_{(max)} = E_c + \frac{E_c}{2} + \frac{E_c}{2} = 2E$$

$$V_{(min)} = E_c - \frac{E_c}{2} + \frac{E_c}{2} = 0V$$

De las relaciones mostradas anteriormente y usando la ecuación 3-10, es evidente que, mientras la modulación no exceda al 100%, la máxima amplitud pico de una envolvente de

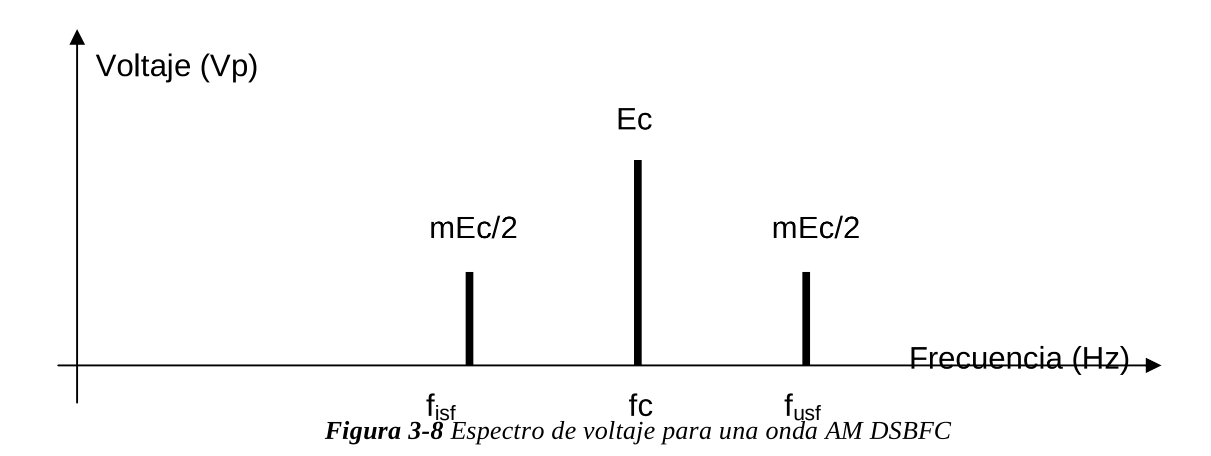


Figura 3-8 *Espectro de voltaje para una onda AM DSBFC*

AM es V(max) = 2Ec y la mínima amplitud pico de una envolvente de AM es V(min.) = 0 V Esta relación se muestra en la Figura 3-6d. La Figura 3-8 muestra el espectro de voltaje para una onda AM DSBFC (observe que todos los voltajes se dan en valores pico).

Además, de la ecuación 3-10, la relación de fase relativa entre la portadora y las frecuencias laterales superiores e inferiores es evidente. La componente de la portadora es una función seno (+), la frecuencia lateral superior un función coseno (-) y la frecuencia lateral inferior una función coseno (+). Además, la envolvente es una forma de onda repetitiva. Por lo tanto, al comienzo de cada ciclo de la envolvente, la portadora está 90° fuera de fase con las frecuencias laterales superiores e inferiores y las frecuencias laterales superiores e inferiores están 180° fuera de fase entre ellas. Esta relación de fase puede verse en la figura 3-9 para fc = 25 Hz y fm = 5 Hz.

EJEMPLO 3-3

Una entrada a un modulador de AM convencional es una portadora de 500 kHz con una amplitud de 20 Vp. La segunda entrada es una señal modulante de 10 kHz de suficiente amplitud para causar un cambio en la onda de salida de ±7.5 Vp. Determine:

(a) Frecuencias laterales superior e inferior.
(b) Coeficiente de modulación y porcentaje de modulación.
(c) Amplitud pico de la portadora modulada y de los voltajes de frecuencia lateral superior e inferior.
(d) Máxima y mínima amplitudes de la envolvente.
(e) Expresión de la onda modulada.
(f) Dibuje el espectro de salida.
(g) Trace la envolvente de salida.

Solución (a) Las frecuencias laterales superior e inferior son simplemente las frecuencias de suma y diferencia, respectivamente.

$$f_{usf} = 500 \text{ kHz} + 10 \text{ kHz} = 510 \text{ kHz}$$

$$f_{isf} = 500 \text{ kHz} - 10 \text{ kHz} = 490 \text{ kHz}$$

(b) El coeficiente de modulación se determina de la ecuación 3-l:

$$m = 7{,}5/20 = 0{,}375$$

El porcentaje de modulación se determina de la ecuación 3-4:

$$M = 100 \text{ X } 0.375 = 37.5\%$$

(c) La amplitud pico de la portadora modulada y las frecuencias laterales superior e inferior es

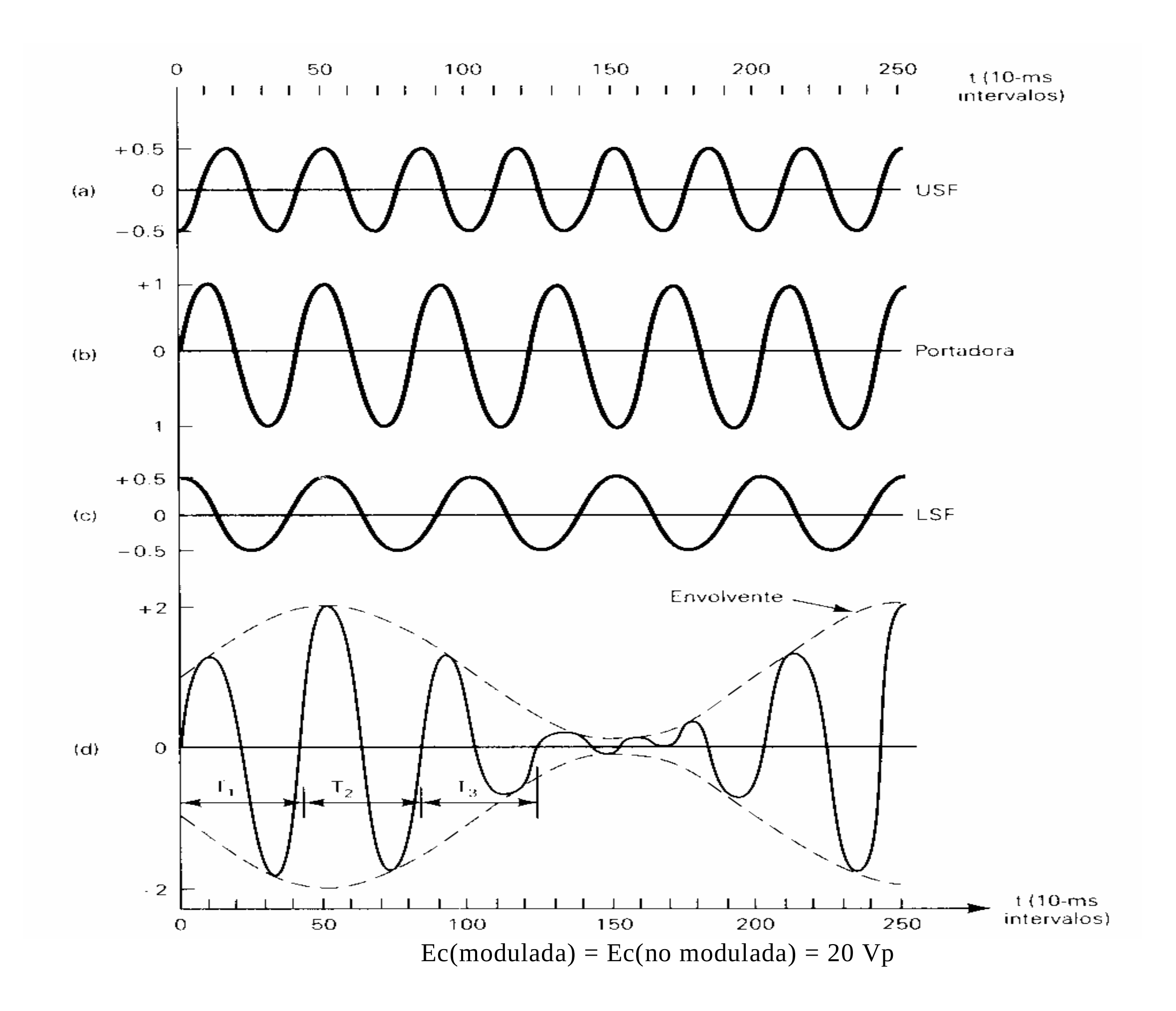


Figura 3-9** Generación de una envolvente de AM DSBFC mostrada en el dominio de tiempo: (a) -* ***1/2cos2π30t; (b) sen2π25t; (c) + 1/2cosπ20t; (d) suma de (a), (b) y (c).

$$E_{usf} = E_{isf} = \frac{mE_c}{2} = \frac{(0{,}375)(20)}{2} = 3{,}75V_p$$

(d) Las amplitudes máxima y mínima de la envolvente son determinadas de la siguiente manera:

V(max)=Ec+Em=20+7.5=27.5Vp
V(min)=Ec-Em=20-7.5= 12.5Vp

(e) La expresión para la onda modulada sigue el formato de la ecuación 3-10.

Vam(t) = 20 sen (2π500kt) - 3.75 cos (2π510kt) + 3.75 cos (2π490kt)

(f) El espectro de salida se muestra en la figura 3-10.

(g) La envolvente modulada se muestra en la figura 3-11.

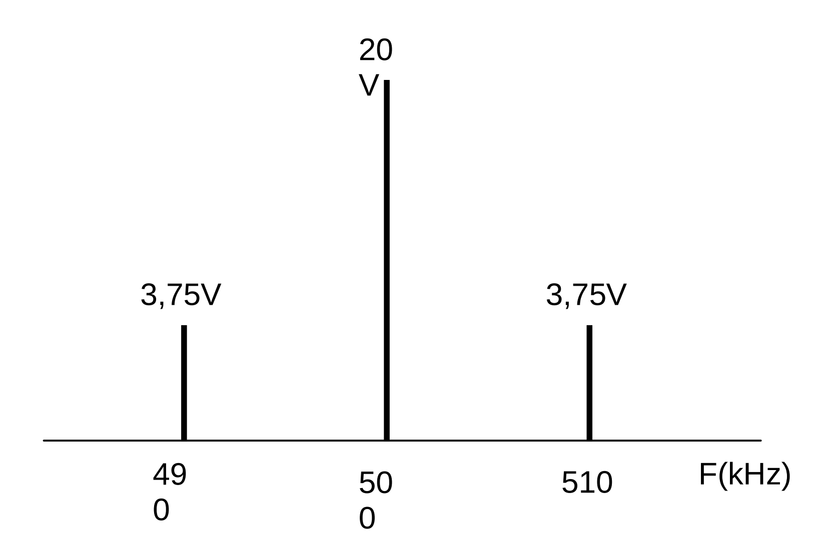


***Figura 3-10** Espectro de salida para el ejemplo 3-3*

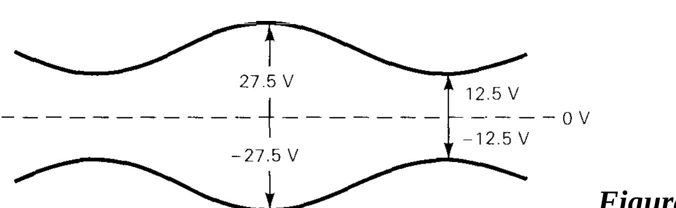


***Figura 3-11** Envolvente de AM para el ejemplo 3-3.*

Análisis de AM en el dominio de tiempo

La figura 3-9 muestra de qué manera una envolvente AM DSBFC es producida desde la suma algebraica de las formas de onda por la portadora y las frecuencias laterales superiores e inferiores. Por simplicidad, se usan las siguientes formas de onda para las señales de entrada modulante y de la portadora:

portadora = $Vc(t) = E_c\, sen\, (2\pi 25t)$

señal modulante = $Vm(t) = E_m\, sen\, (2\pi 5t)$

Al sustituir las ecuaciones 3-11 y 3-12 en la ecuación 3-10, la expresión para la onda modulada es

$$V_{am}(t) = E_c\,\text{sen}(2\pi\, 25t) - \frac{mE_c}{2}\cos(2\pi\, 30t) + \frac{mE_c}{2}\cos(2\pi\, 20t) \quad (3\text{-}13)$$

en donde Ec sen (2π25t) = portadora (volts)

(-mEc/2)cos (2π30t) = frecuencia lateral superior (volts)

(+mEc/2)cos (2π30t) = frecuencia lateral inferior (volts)

La tabla 3-1 muestra los valores para los voltajes instantáneos de la portadora, voltajes de las frecuencias laterales superior e inferior y el total de la onda modulada cuando se sustituyen los valores de t, desde 0 a 250 ms, en intervalos de 10 ms, en la ecuación 3-13. Se realiza el voltaje de la portadora no modulada Ec = 1Vp y la modulación al 100%. Las formas de onda correspondientes se muestran en la figura 3-9. Observe que el voltaje máximo de la envolvente es 2V ($2E_c$) y el voltaje mínimo de la envolvente es 0 V.

En la figura 3-9, observe que el tiempo entre cruces de cero similares dentro de la envolvente es constante (es decir, $T_1 = T_2 = T_3$, y así sucesivamente). También observe que las amplitudes de los picos sucesivos dentro de la envolvente no son iguales. Esto indica que un ciclo dentro de la envolvente no es una onda seno pura y por lo tanto, la onda modulada debe componerse de más de una frecuencia: la suma de la portadora y las frecuencias laterales superiores e inferiores. La figura 3-9 también muestra que la amplitud de la portadora no varía, pero en cambio, la amplitud de la envolvente varía de acuerdo con la señal modulante. Esto se logra con la suma de las frecuencias laterales superiores e inferiores a la forma de onda de la portadora

TABLA 3-1 VOLTAJES INSTANTÁNEOS				
USF, -1/2 cos $2\pi30t$	Portadora, sen $2\pi25t$	LSF, +1/2 cos $2\pi20t$	Envolvente V_{am} (t)	Tiempo t (ms)
-0.5	0	+0.5	0	0
+0.155	+1	+0.155	+1.31	10
+0.405	0	-0.405	0	20
-0.405	-1	-0.405	-1.81	30
-0.155	0	+0.155	0	40
+0.5	+ 1	+0.5	2	5 0
-0.155	0	+0.155	0	60
-0.405	-1	-0.405	-1.81	70
+0.405	0	-0.405	0	80
+0.155	+1	+0.155	+1.31	90
-0.5	0	+0.5	0	100
+0.155	-1	+0.155	-0.69	110
+0.405	0	-0.405	0	120
-0.405	+1	-0.405	+0.19	130
-0.155	0	+0.155	0	140
+0.5	-1	+0.5	0	150
-0.155	0	+0.155	0	160
-0.405	+1	-0.405	+0.19	170
+0.405	0	-0.405	0	180
+0.155	-1	+0.155	-0.69	190
	0	+0.5	0	200
+0.155	+1	+0.155	+1.31	210
+0.405	0	-0.405	0	220
--0.405	-1	-0.405	-1.81	230
+0.405	0	-0.405	0	240
+0.155	+I	+0.155	+1.31	250

Ancho de banda

El ancho de banda de la señal es una de las características más importantes de cualquier esquema de modulación. En general, es deseable un ancho de banda angosto. En cualquier situación donde el uso del espectro esté limitado, un ancho de banda angosto permite que más señales sean transmitidas en forma simultánea que un ancho de banda más amplio. También permite que se utilice un ancho de banda más angosto en el receptor. Puesto que el ruido térmico ordinario se distribuye de manera uniforme en el dominio de la frecuencia, la utilización de un ancho de banda más estrecho en los receptores incluirá menos ruido, incrementando así la relación señal a ruido. Hay una excepción importante a la regla general de que reducir el ancho de banda mejora la relación señal a ruido. La excepción es para la modulación de frecuencia de banda ancha, que se describe en el capítulo 6. Sin embargo, el receptor debe tener un ancho de banda suficiente para que pase la señal completa incluyendo las bandas laterales, o habrá distorsión. En consecuencia, tendrá que calcularse el ancho de banda de la señal para cada uno de los esquemas de modulación que se consideren.

Este cálculo es muy fácil para AM. La señal se extiende desde la frecuencia lateral inferior, que está a la frecuencia de la portadora menos la frecuencia de la moduladora, hasta la frecuencia lateral superior, a la frecuencia de la portadora más la frecuencia de la moduladora. La diferencia entre éstas es simplemente dos veces la frecuencia de la moduladora.
Si se tiene una señal moduladora más complicada, con más de una frecuencia moduladora, el ancho de banda será el doble de la frecuencia moduladora más alta. Para la voz con calidad telefónica, por ejemplo, un ancho de banda de alrededor de 6 kHz sería suficiente, en tanto que una señal de vídeo con una frecuencia de banda base máxima de 4 MHz necesitaríamos 8 MHz de ancho de banda si se transmite de esta manera (puesto que un canal de televisión tiene de ancho sólo 6 MHz, puede suponerse correctamente, que la televisión debe transmitirse en realidad mediante un esquema de modulación más complejo que utilice menos ancho de banda).
Matemáticamente, la relación es:

$$B = 2F_m$$

donde B = ancho de banda en hertz
F_m = frecuencia moduladora más alta en hertz

A propósito, muchas personas suponen que debido a que los canales de radiodifusión de AM se asignan también a intervalos de 10 KHz, hay una limitación similar en la respuesta de frecuencia de audio para la radiodifusión. Éste no es el caso: los transmisores de radio AM generalmente tienen una respuesta de frecuencia de audio que se amplía hasta cerca de 10 KHz, dando un ancho de banda de señal modulada teórico de 20 KHz. Esto funciona porque los canales adyacentes no son asignados en la misma localidad, así que es imposible el traslape. Por ejemplo, si su ciudad tiene una estación en 1.000 kHz, no habrá una a 990 o 1.010 kHz. A fin de reducir la interferencia desde estaciones distantes, muchos receptores de AM tienen un ancho de banda reducido y, en consecuencia, una respuesta de frecuencia de audio limitada.

Distribución de la potencia de AM

La potencia es importante en cualquier esquema de comunicaciones debido a que la crucial relación señal a ruido en el receptor, depende mucho de que sea grande la potencia de la señal como de que sea pequeña la potencia del ruido. Sin embargo, la potencia que es más importante, no es la potencia de señal total sino sólo la porción que se utiliza para transmitir información. Puesto que la portadora en una señal de AM permanece sin cambio con la modulación, no contiene información. Su única función es ayudar a desmodular la señal en el receptor. Esto hace que en AM se desperdicie potencia, en comparación con otros esquemas de modulación que se describirán después.
La forma más fácil de considerar la potencia en una señal de AM es usar el dominio de la frecuencia. Puede determinarse la potencia en cada componente de la frecuencia y, luego, sumarlas para obtener la potencia total. Se supondrá que la señal aparece a través de una resistencia R, de modo que se ignoran los volt-amperes reactivos. Se supone también que la potencia requerida es la potencia promedio.
Suponga que la señal moduladora es una onda seno. Entonces, la señal AM consiste en tres sinusoides, la portadora y dos frecuencias laterales (bandas laterales), como se ilustra en la *figura 3.10*.
Es fácil calcular la potencia en la portadora, puesto que la portadora en sí es una onda seno.

En cualquier circuito eléctrico, la potencia disipada es igual al voltaje rms al cuadrado, dividido por la resistencia (es decir, $P = E^2/R$). Por lo tanto, la potencia desarrollada a través de una carga por una portadora no modulada es igual al voltaje de la portadora al cuadrado, dividido por la resistencia de carga. Matemáticamente, para una onda sinusoidal la potencia de la portadora no modulada se expresa como

$$P_c = \frac{\left(\frac{E_c}{\sqrt{2}}\right)^2}{R} = \frac{E_c^2}{2R} \qquad (3\text{-}14)$$

en donde Pc = potencia de la portadora (watts)
Ec = voltaje pico de la portadora (volts) R = resistencia de carga (ohms)

Las potencias de las bandas laterales superiores e inferiores se expresan matemáticamente como

$$P_{usb} = P_{isb} = \frac{\left(mE_c/2\right)^2}{2R} = \frac{m^2E_c^2}{8R} \qquad (3\text{-}15)$$

en donde *mEc/2 = voltaje pico de las frecuencias laterales superiores e inferiores*
P_{usb} *= potencia de la banda lateral superior (watts)*
P_{isb} *= potencia de la banda lateral inferior (watts)*

$mE_c/2$ = voltajes picos de las bandas laterales superior e inferior

Sustituyendo la ecuación 3-14 en la ecuación 3-15 produce

$$P_{usb} = P_{isb} = \frac{m^2 P_c}{4} \tag{3-16}$$

Es evidente de la ecuación 3-16 para un coeficiente de modulación $m = 0$ la potencia en las bandas laterales superiores e inferiores es cero y el total de la potencia transmitida es simplemente la potencia de la portadora.

La potencia total en una onda de amplitud modulada es igual a la suma de las potencias de la portadora, la banda lateral superior y la banda lateral inferior. Matemáticamente, la potencia total en una envolvente AM DSBFC es

$$\mathbf{P_t = P_c + P_{usb} + P_{isb}} \tag{3-17}$$

en donde P_t = *potencia total de la envolvente de AM DSBFC (watts)*
P_c = *potencia de la portadora (watts)*
P_{usb} = *potencia de la banda lateral superior (watts)*
P_{isb} = *potencia de la banda lateral inferior (watts)*

Sustituyendo la ecuación 3-16 en la ecuación 3-17 produce

$$P_t = P_c + \frac{m^2 P_c}{4} + \frac{m^2 P_c}{4} \quad (3-18)$$

$$\boxed{P_t = P_c + \frac{m^2 P_c}{2} \quad (3-19)}$$

Del análisis precedente, puede observarse que la potencia de la portadora en la onda modulada es igual a la potencia de la portadora en la onda no modulada. Por lo tanto, es evidente que la potencia de la portadora **no es afectada** por el proceso de modulación. Además, debido a que la potencia total en la onda AM es la suma de las potencias de la portadora y de la banda lateral, la potencia total en una envolvente de AM incrementa con la modulación (es decir, conforme *m* incrementa P_t incrementa).

Estas últimas ecuaciones contienen varias cosas útiles:

La potencia total en una señal de AM aumenta con la modulación, alcanzando un valor 50% mayor que el de la portadora sin modulación para modulación del 100%. Como se verá, este resultado tiene consecuencias para el diseño del transmisor.

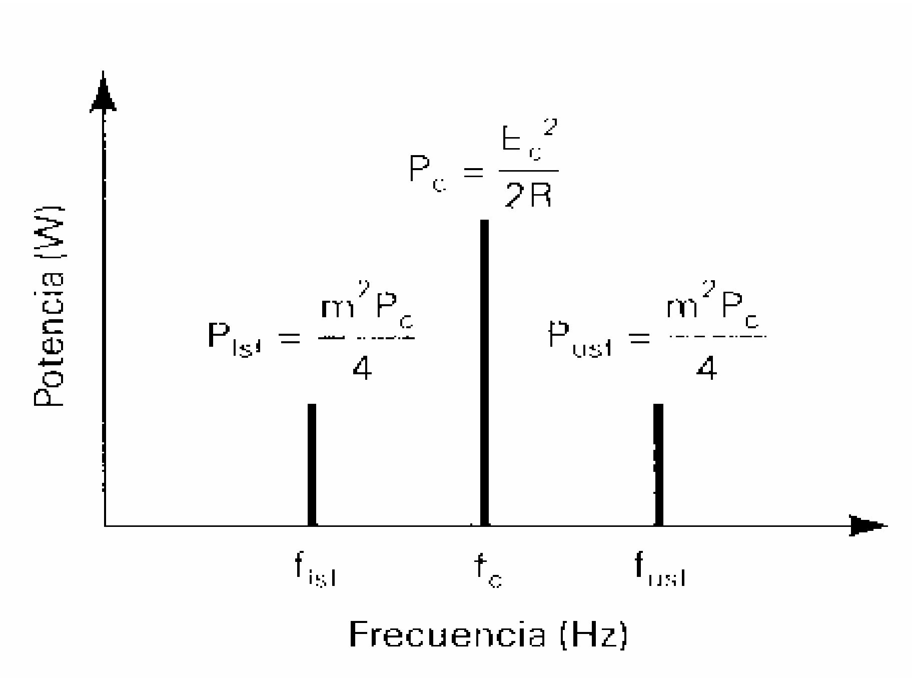
1) La potencia extra con la modulación va hacia las bandas laterales
2) la potencia de la portadora no cambia con la modulación.
3) La potencia útil, es decir, la que lleva la información, es muy pequeña, ya que alcanza un máximo de un tercio de la potencia total de la señal para modulación del 100% y mucho menos a índices de modulación menores.

Por esta razón, la transmisión de AM es más eficaz cuando el índice de modulación es tan cercano a 1 como se permita en la práctica.

EJEMPLO: Un radiotransmisor de AM tiene una salida de potencia de portadora de 50kW. ¿Qué potencia total se produciría con modulación del 80%?

Solución

$$P_t = P_c\left(1 + \frac{m^2}{2}\right)$$
$$= (50\text{ kW})\left(1 + \frac{0.8^2}{2}\right)$$
$$= 66\text{ kW}$$



La figura 3-12 muestra el espectro de potencia para una onda AM DSBFC. Observe que con 100% de modulación la máxima potencia en la banda lateral superior o inferior es igual a sólo una cuarta parte de la potencia en la portadora. Por lo tanto, la máxima potencia total de las bandas laterales es igual a la mitad de la potencia de la portadora. Una de las desventajas más importantes de la transmisión AM DSBFC es el hecho que la información está contenida en las bandas laterales aunque la mayoría de la potencia se desperdicia en la portadora. En realidad, la potencia en la portadora no es totalmente

Figura 3-12 *Espectro de potencia para una onda AM DSBFC*

desperdiciada puesto que permite el uso de circuitos de demodulación baratos y relativamente sencillos en el receptor, la cual es la ventaja predominante de un AM DSBFC. (Acceso masivo a la información)

EJEMPLO

Para una onda AM DSBFC con un voltaje pico de la portadora no modulada V = 10 Vp, una resistencia de carga $R_L = 10\ \Omega$, y el coeficiente de modulación m = 1, determine:

(a) Potencias de la portadora y las bandas laterales superior e inferior.
(b) Potencia total de la banda lateral.
(c) Potencia total de la onda modulada.
(d) Dibuje el espectro de potencia.
(e) Repita los pasos hasta d) para un índice de modulación m = 0.5.

Solución (a) La potencia de la portadora se encuentra sustituyendo en la ecuación 3-14:

$$P_c = \frac{10^2}{2(10)} = \frac{100}{20} = 5W$$

La potencia de la banda lateral superior e inferior se encuentra sustituyendo en la ecuación 3-16:

$$P_{usb} = P_{isb} = \frac{(1^2)(5)}{4} = 1{,}25W$$

(b) La potencia total de la banda lateral es

$$P_{sbt} = \frac{m^2 P_c}{2} = \frac{(1)^2(5)}{2} = 2{,}5W$$

(c) La potencia total en la onda modulada se encuentra sustituyendo en la ecuación 3-20

$$P_t = 5[1 + \frac{1^2}{2}] = 7{,}5W$$

(d) El espectro de potencia se muestra en la figura 3-13.

(e) La potencia de la portadora se encuentra sustituyendo en la ecuación 3-14:

$$P_c = \frac{10^2}{2(10)} = \frac{100}{20} = 5W$$

La potencia de la banda lateral superior e inferior se encuentra sustituyendo en la ecuación 3-16:

$$P_{usb} = P_{isb} = \frac{(0{,}5)^2(5)}{4} = 0{,}3125W$$

El total de la potencia de la banda lateral es

$$P_{sbt} = \frac{m^2 P_c}{2} = \frac{(0{,}5)^2(5)}{2} = 0{,}625W$$

El total de potencia de la onda modulada se encuentra sustituyendo en la ecuación 3-20

$$P_t = 5[1 + \frac{0{,}5^2}{2}] = 5{,}625W$$

El espectro de potencia es mostrado en la figura 3-14.

Del ejemplo 3-4, puede observarse por qué es importante utilizar la cantidad más alta del porcentaje de modulación que sea posible, mientras se asegure de no sobremodular. Como lo muestra el ejemplo, la potencia de la portadora permanece igual conforme “**m**” cambia.

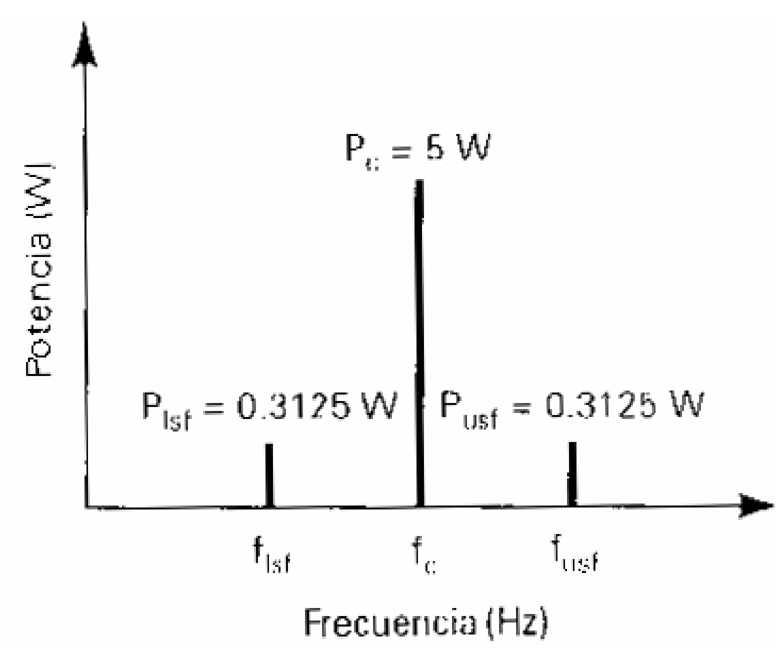


Figura 3-14 *Espectro de potencia para el ejemplo 3-4e*

Sin embargo, la potencia de la banda lateral **se redujo** dramáticamente cuando **m** disminuyó de 1 a 0.5. Debido a que la potencia de la banda lateral es proporcional al cuadrado del coeficiente de la modulación, una reducción en **m** a la mitad resulta en una reducción en la potencia de la banda lateral en una cuarta parte (es decir, $0.5^2 = 0.25$). La relación entre el coeficiente de modulación y la potencia puede a veces ser engañosa porque el total de la potencia transmitida consiste principalmente de la potencia de la portadora y, por lo tanto, no afecta dramáticamente a los cambios en **m**. Sin embargo, debe observarse que la potencia en la porción del transporte inteligente de la señal transmitida (es decir, las bandas laterales) es afectada dramáticamente por los cambios en m. Por esta razón, los sistemas AM DSBFC tratan de mantener un coeficiente de modulación entre 0.9 y 0.95 (90% a 95% de modulación) para las señales inteligentes de amplitud más alta.

Medición del índice de modulación en el dominio de la frecuencia

Puesto que la razón o cociente entre la potencia de la banda lateral y la portadora es una función simple de m, es bastante posible medir el índice de modulación si se observa el espectro de una señal de AM. La única ligera complicación es que los analizadores de espectro generalmente muestran razones de potencia en decibeles. La razón de potencia entre la banda lateral y la portadora se determina fácilmente a partir de la expresión:

$$\frac{P_{lsb}}{P_c} = \text{antilog}\,(dB/10)$$

donde P_c = potencia de la portadora

P_{lsb} = potencia en una banda lateral (para este ejemplo se eligió la inferior, pero por supuesto la banda lateral superior tiene la misma potencia)

dB = diferencia entre las señales de la banda lateral y la portadora, medida en decibeles (este número será negativo)

Una vez determinada la razón entre la potencia de la portadora y de la banda lateral, es fácil calcular el índice de modulación a partir de la ecuación de la potencia

$$P_{lsb} = \frac{m^2}{4} P_c$$
$$m^2 = \frac{4P_{lsb}}{P_c}$$
$$m = 2\sqrt{\frac{P_{lsb}}{P_c}}$$

EJEMPLO 3.8 Calcule la frecuencia de modulación f_m y el índice de modulación m para la pantalla del analizador de espectro mostrada en la figura 3.15.
Solución: Determinemos primero f_m. La diferencia entre la portadora y cualquiera de las bandas laterales es de dos divisiones con cinco kHz/división, o 10 kHz. Así que f_m es 10 kHz.

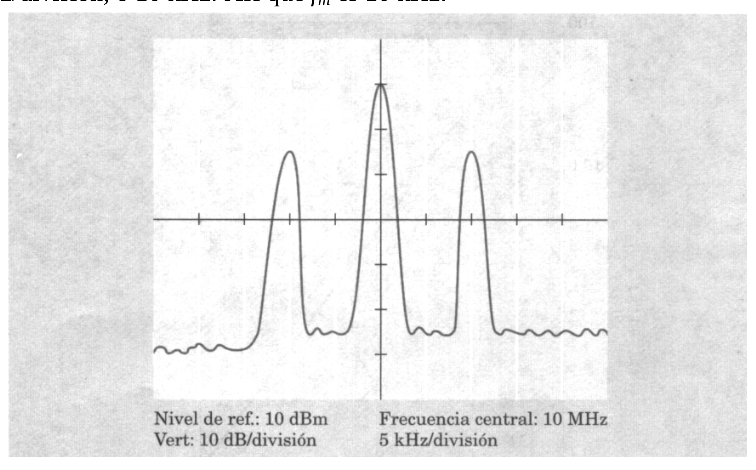


Figura 3.15.- Espectro de una señal de AM
A continuación, es necesario determinar el índice de modulación. Las dos bandas laterales tienen la misma potencia, así que puede utilizarse cualquiera. Utilicemos la inferior. El analizador de espectro se fija en 10 dB/división, y el de la banda lateral es 1.5 divisiones o 15 dB menor que el de la portadora.

$$\frac{P_{lsb}}{P_c} = \text{antilog}\left(\frac{-15}{10}\right) = 0.0316$$
$$m = 2\sqrt{\frac{P_{lsb}}{P_c}} = 2\sqrt{0.0316} = 0.356$$

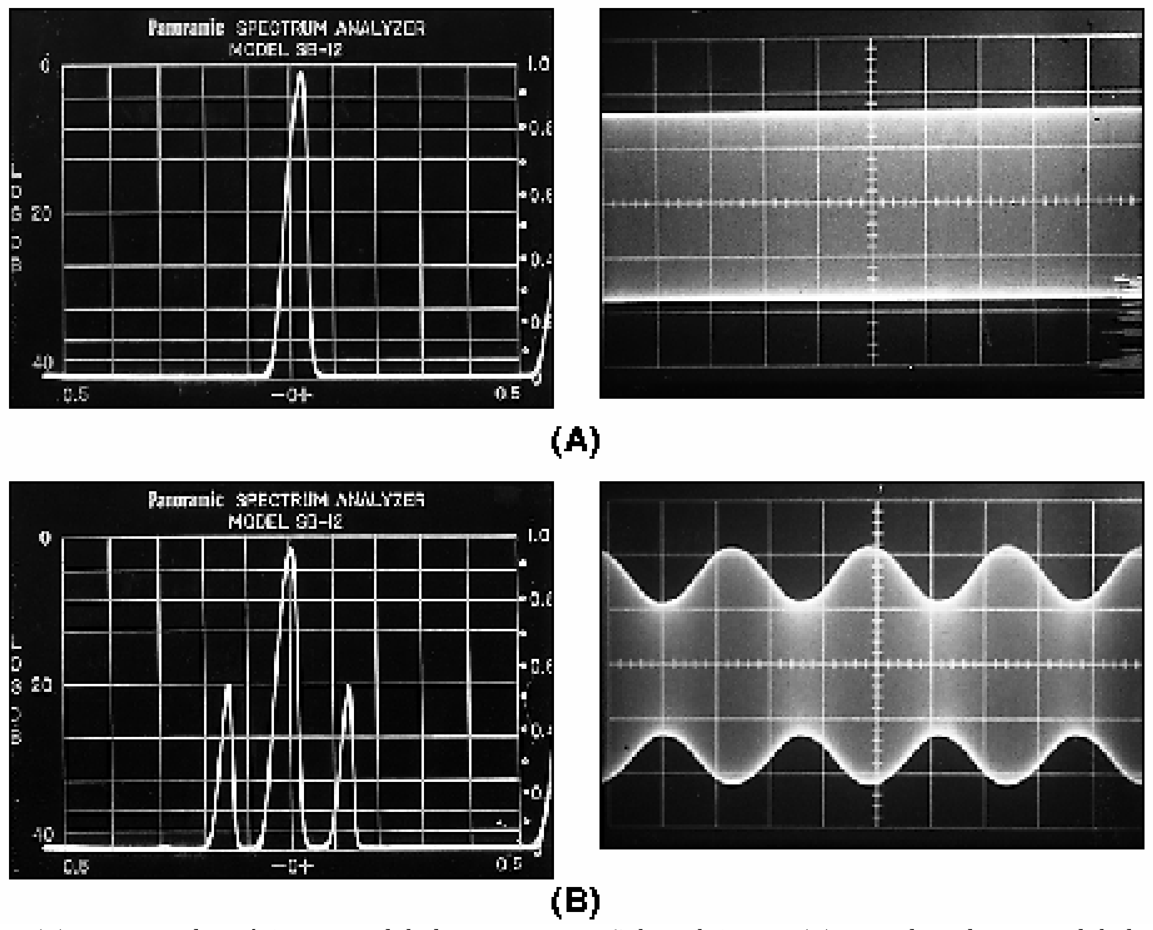


Figura 3-15 (A) Una portadora única no modulada; espectro y señal en el tiempo. (B) Portadora de AM modulada con un solo tono sinusoidal; se ven la portadora y las dos frecuencias laterales.

AM en cuadratura y AM estéreo

Es posible enviar dos señales de información separadas empleando la modulación de amplitud con una frecuencia portadora. Esto se lleva a cabo al generar dos portadoras a la misma frecuencia, pero con una separación de fase de 90°. Entonces, cada una es modulada por una señal de información separada y se suman las dos señales resultantes. Debido a que hay un desplazamiento de fase de 90°, el esquema se llama AM en cuadratura (QUAM o QAM). En la figura 3.12 se ilustra cómo puede ponerse en práctica.

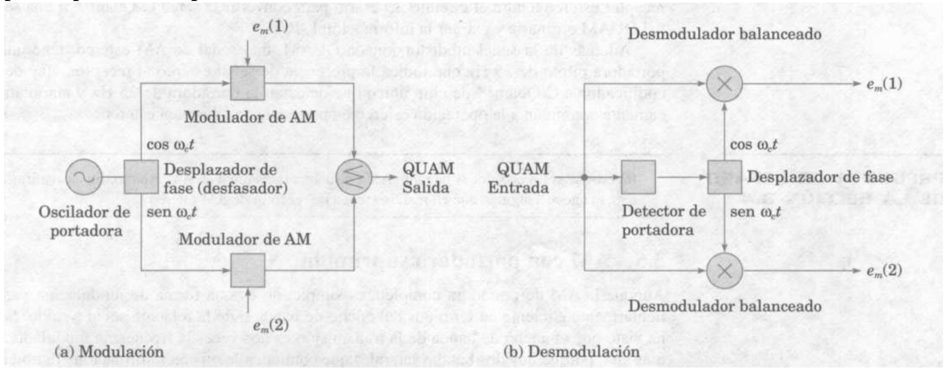


Figura 3.16 Cuadratura AM

La recuperación de las dos señales de información requiere detección síncrona por medio de dos desmoduladores balanceados. Los desmoduladores se construyen con portadoras de referencia que tienen exactamente la misma frecuencia y fase que las portadoras originales. De lo contrario, la salida de cada detector será una combinación de las dos señales en banda base. En la figura 3.12(b) se da la idea general. Los desmoduladores balanceados son en esencia lo mismo que los mezcladores balanceados descritos en el capítulo 2.

AM en cuadratura es un esquema mucho más complejo que AM ordinaria. Hasta hace poco, sus aplicaciones principales han sido en la transmisión de datos y en la televisión a color. La razón principal de incluir una introducción breve en relación con esto, es que una variación de QUAM se utiliza también para la transmisión de AM estéreo. El esquema utilizado se llama C-QuamTm y lo desarrolló Motorola, Inc.
AM en cuadratura podría utilizarse para transmitir señales estéreo sin ningún incremento en el ancho de banda al modular cada portadora con un canal (izquierdo o derecho). Desafortunadamente, AM en cuadratura ordinaria no sería muy adecuado para transmisiones estéreo, porque no sería compatible con los detectores de envolvente utilizados en los radios de AM ordinarios. Por compatibilidad, este tipo de detector debe producir una señal monoaural (mono) que consiste en la suma de los dos canales. Con el sistema antes descrito se obtendrían señales distorsionadas en un radio ordinario (mono). Matemáticamente, la señal producida por un detector de envolvente ideal sería:

$$v(t) = \sqrt{[1 + v_L(t) + v_R(t)]^2 + [v_L(t) - v_R(t)]^2}$$

donde $v_L(t)$ y $v_R(t)$ representan los voltajes de la señal del lado izquierdo y del lado derecho, respectivamente. Es fácil ver que esto representa una señal de suma (v_i, + v_R) (más un componente de cc) sólo cuando v_i — v_R = 0, es decir, cuando la señal original es monoaural. De otro modo, habrá términos de la forma $v_L v_R$, que representan la distorsión de intermodulación.
El sistema C-QuamTM resuelve este problema mediante la predistorsión de la señal QUAM, con la finalidad de que la envolvente de la señal resultante represente la suma de los dos canales estéreo (conocida como la señal L + R). Por lo tanto, en un receptor monoaural, con un detector de envolvente ordinario, se recibirá una señal L + R. Un receptor estéreo tendrá el circuito necesario para convertir la señal C-QuamTM a una señal QUAM ordinaria y extraer la información L-R.
Además de la señal predistorsionada QUAM, una señal de AM estéreo tiene una portadora piloto de 25 Hz que indica la presencia de señal estéreo al receptor. Hay de-codificadores C-QuamTM de chip único que detectan la portadora de 25 Hz y automáticamente conmutan a la operación estéreo en presencia de una señal estéreo.

RESUMEN AM

1. Modulación es el proceso de hacer que la información que va a comunicarse modifique una señal que tiene una frecuencia más alta llamada portadora.
2.La modulación de amplitud (AM) es la forma más antigua y simple de la acción moduladora.
3.En la AM, la amplitud de la portadora se modifica de acuerdo con la amplitud y la frecuencia, o las características de la señal moduladora. La frecuencia de la portadora permanece constante.
4.La variación de la amplitud de los picos de la portadora tiene la forma de la señal moduladora y se conoce como envolvente.
5.Una representación en el dominio de tiempo muestra la amplitud en función de la variación en el tiempo de señales de AM y otras.
6.La modulación de amplitud la produce un circuito llamado modulador que tiene dos entradas y una salida.
7. El modulador efectúa una multiplicación matemática de las señales portadora y de información. La salida es su producto analógico y su suma vectorial.
8. La portadora en una señal de AM es una onda senoidal que puede modularse por señales de información analógicas o digitales.
9. La modulación de amplitud de una portadora por una señal binaria produce manipulación por desplazamiento de amplitud (ASK).
10.El cociente del valor Vm del voltaje pico de la señal moduladora y el valor pico Vc de la portadora se llama índice de modulación, m (m = Vm/Vc). También se le conoce como el coeficiente o factor de modulación, y como el grado de modulación.
11.El valor ideal de m es 1. De manera típica, m es menor que 1. Deberá evitarse la condición en que m es mayor que 1, ya que introduce una seria distorsión de la señal moduladora. Esto se conoce como sobremodulación.
12. El índice de modulación multiplicado por 100 es el porcentaje de modulación.
13. El porcentaje de modulación puede calcularse de las formas de onda de AM visualizadas en un osciloscopio mediante la expresión

$$\%\,\text{mod} = \frac{100(V_{max} - V_{min})}{V_{max} + V_{min}}$$

donde $V_{máx}$ es la amplitud pico máxima de la portadora, y V_{min}, la amplitud pico mínima de la portadora.

14. Las nuevas señales generadas por el proceso de modulación se llaman bandas laterales y ocurren en las frecuencias situadas arriba y abajo de la frecuencia de la portadora.
15.Las frecuencias de las bandas lateral superior, f_{BLS}, Y lateral inferior, f_{BLI}, son la suma y la diferencia de la frecuencia de portadora fc y la frecuencia moduladora fm. Se calculan con las expresiones
f_{BLS} = fc + fm f_{BLI} =fc -fm
16.La representación de la amplitud de una señal con respecto a la frecuencia se llama representación en el dominio de frecuencias.
17.Una señal de AM puede considerarse como la señal de portadora sumada a las señales de las bandas laterales que produce la modulación de amplitud.
18.La potencia total transmitida en una señal de AM es la suma de las potencias de la portadora y de las bandas laterales ($P_T = P_c + P_{BLS} + P_{BLI}$) y se distribuye entre la portadora y las bandas laterales. Esta distribución de potencia varía con el porcentaje de modulación. La potencia total es

$$P_T = P_c(1+m^2/2)$$

La potencia en cada banda lateral es

$$P_s = \frac{P_c(m^2)}{4}$$

19.Cuanto más alto sea el porcentaje de modulación, tanto mayor será la potencia en las bandas laterales, y más intensa e inteligible será la señal transmitida y recibida.
20. No obstante su sencillez y efectividad, la modulación de amplitud es un método de modulación muy ineficaz.
21.En una señal de AM, la portadora no tiene ninguna información. Toda la información transmitida está exclusivamente en las bandas laterales. Por ello, la portadora puede suprimirse y no transmitirse.
22.La señal de AM con la portadora suprimida se denomina señal de doble banda lateral (DBL).
23. No hay razón inherente de por qué la radio AM debe tener mala calidad de audio. Gran parte del problema radica en los receptores cuyo ancho de banda es muy reducido para incluir todas las bandas laterales de la señal de radiodifusión. Muchos receptores de AM, entre otros los que se incluyen con sistemas de audio de alta fidelidad, tienen una respuesta de audio que se extiende sólo hasta alrededor de 4 kHz.
En un intento por compensar esto, la mayoría de los radiodifusores de AM refuerzan las frecuencias de audio superiores antes de la modulación. A esto se le llama preénfasis. El problema es que hasta la fecha no existe estándar para la cantidad de reforzamiento utilizado.
La FCC de Estados Unidos tomó decisiones recientes para estandarizar la cantidad de preénfasis y determinó también que las estaciones podrían transmitir una señal de audio con frecuencias de hasta 10 kHz (20 kHz de ancho de bando total). La banda de AM se amplió ahora a 1 700 kHz. Al mismo tiempo, la Electronics Industry Association en Estados Unidos desarrolló un estándar voluntario para los receptores que requieren respuesta de audio razonablemente plana hasta por lo menos 7.5 kHz, con una opción de selección de reducción de ancho de banda para evitar interferencia.
Será interesante ver si estas mejoras, más la estandarización de la AM estéreo al sistema C-QuamTM de Motorola (analizado en la sección 3.4), revierte la disminución de popularidad de la AM comparada con la difusión FM.

Elija la letra que dé la mejor respuesta a cada pregunta.

2-1. Hacer que una señal modulante cambie alguna característica de una señal portadora se llama
a) Multiplexión. b) Modulación. c) Duplexión. d) Mezclado lineal.
2-2. ¿Cuál de los siguientes enunciados sobre modulación de amplitud no es verdadero?
a) La amplitud de portadora varía.
b) La frecuencia de portadora permanece constante. c) La frecuencia de portadora cambia.
d) La amplitud de la señal de información modifica la amplitud de portadora.
2-3. Lo contrario de modulación es a) Modulación inversa.
b) Modulación descendente. c) Modulación nula.
d) Demodulación.
2-4. El circuito para producir modulación se llama
a) Modulador. b) Demodulador. c) Amplificador de ganancia variable. d) Multiplexor.
2-5. ¿Qué operación matemática efectúa un circuito modulador en sus dos entradas?
a) Adición. b) Multiplicación. c) División. d) Raíz cuadrada.
2-6. El cociente del voltaje pico de la señal moduladora y el voltaje pico de la portadora se denomina

a) Relación de voltajes. b) Número de decibeles. c) Índice de modulación. d) Factor de mezcla.
2-7. ¿Qué ocurre si *m* es mayor que l ?
a) Una operación normal. b) La portadora desciende a cero. c) La frecuencia de portadora cambia. d) La señal moduladora se distorsiona.
2-26. El intervalo típico de frecuencias moduladoras de audio aplicado en comunicaciones de radio y telefonía es:
a) 50 Hz a 5 kHz. b) 50 Hz a 15 kHz. c)100 Hz a 10 kHz. d) 300 Hz a 3 kHz.
2-27. La señal de AM con una frecuencia máxima de la señal moduladora de 4.5 kHz tiene un ancho de banda total de
a) 4.5 kHz. b) 6.75 kHz. c) 9 kHz. d) 18 kHz.
2-28. La distorsión de la señal moduladora produce armónicas que ocasionan un incremento en
a) La potencia de la señal portadora. b) El ancho de banda de la señal. c) La potencia de las bandas laterales de la señal. d) El voltaje de la envolvente de la señal.
2-29. Si en la figura 2-4b), el valor pico de la portadora es 7 V, ¿cuál es el porcentaje de modulación?
a) 0%. b) 50%. c) 75%. d) 100%. 2-30. El ancho de banda de una señal de BLU con una frecuencia de portadora de 2.8 MHz y una señal moduladora con un intervalo de frecuencias de 250 Hz a 3.3 kHz es a) 500 Hz.
b) 3 050 Hz.
c) 6.6 kHz. d) 7.1 kHz.